

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Simulace dynamického řízení světelně řízené křižovatky

Dynamic Controlling Simulation of Light Controlled Crossroad

Student:

Bc. Lukáš MÝDLO

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal DORDA, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lukáš Mýdlo**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 30 Technologie dopravy
Téma: **Simulace dynamického řízení světelně řízené křižovatky**
Dynamic Controlling Simulation of Light Controlled Crossroad

Zásady pro vypracování:

Osnova práce:

1. Úvod
2. Teoretická východiska pro řešení práce
3. Analýza dat potřebných pro simulaci
4. Tvorba simulačního modelu v prostředí Witness
5. Validace simulačního modelu
6. Provedené experimenty a jejich vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Technické podmínky TP 81 - Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu. Brno: Centrum dopravního výzkumu. 1996. 111 s. ISBN 80-902141-2-6.
MEDELSKÁ, V. a kol. *Dopravné inženýrství.* Bratislava: Alfa Bratislava. 1991. ISBN 80-05-00737-X.
Manuály k simulačnímu software Witness.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. května 2013



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. května 2013



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Lukáš MÝDLO

Adresa trvalého pobytu autora práce:

V. Makovského 5, Ostrava – Poruba, 70800

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Dordovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavovi Laštůvkovi z Ostravských komunikací, a.s. za poskytnuté materiály k řešení křižovatce a Ing. Jiřímu Lazarovi z odboru dopravy Magistrátu města Ostravy za poskytnutý kamerový záznam řešení křižovatky.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MÝDLO, L. *Simulace dynamického řízení světelně řízené křižovatky: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2013, 67 s. Vedoucí práce: Dorda, M.

Diplomová práce se zabývá simulací dynamického řízení světelně řízené křižovatky. Práce se skládá z několika částí. Úvodní kapitola se skládá z teoretických pojmů věnujících se křižovatkám, je zde popsáno a vysvětleno dynamické řízení a statistické metody, které budou v práci aplikovány. Následující část se věnuje dopravnímu průzkumu a vyhodnocení dat, která se z průzkumu získala. Třetí úsek se skládá z konstrukce simulačního modelu. Čtvrtá část práce je zaměřena na validaci simulačního modelu a experimenty. V závěrečné části jsou popsány výsledky, které z výsledných řešení vyplynuly.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MÝDLO, L. *Dynamic Controlling Simulation of Light Controlled Crossroad: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical Engineering, Institute of Transport, 2013, 67 p. Thesis head: Dorda, M.

The Master Thesis deals with dynamic controlling simulation of light controlled crossroad. This work is composed of some parts. The introduction consist of theoretical terms dedicated to crossroads. Dynamic control and statistical methods, which are used in this work, are described here. Second part concerns a traffic survey and data evaluatinon acquired in a survey. Third part consist of formation of simulation model. Next part is focused on validation of simulation model and on experiments. The last part is review of outcomes to which was come to in this work.

Obsah diplomové práce

	Seznam použitých značek a symbolů.....	8
1	Úvod.....	9
2	Teoretická východiska pro řešení práce.....	10
2.1	Křižovatky	10
2.2	Značení pro situační plány světelné signalizace	12
2.3	Systémy řízení.....	12
2.4	Detektory	14
2.5	Testování statistických hypotéz	14
2.6	Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti	18
2.7	Exponenciální rozdělení	19
2.8	Odhady parametrů základního souboru	20
3	Analýza dat potřebných pro simulaci.....	24
3.1	Lokalita křižovatky	24
3.2	Charakteristika ramen křižovatky	26
3.3	Údaje zjištěné dopravním průzkumem	31
3.3.1	Zjištění intenzit vozidel pro jednotlivé řadící pruhy	32
3.3.2	Zjištění skladby dopravních proudů	43
3.3.3	Stanovení počtu vozidel ve frontě	45
3.3.4	Zjištění způsobu řízení křižovatky	47
3.3.5	Zjištění vzdáleností dopravních detektorů od stopčáry	49
4	Tvorba simulačního modelu v prostředí Witness.....	51
4.1	Definování veličin.....	51
4.2	Význam vstupních veličin	52
4.3	Význam výstupních veličin	64
5	Validace simulačního modelu	66
6	Experiment	68
6.1	Experiment věnovaný počtu přijíždějících vozidel	68
6.2	Experiment věnovaný vlivu na umístění detektorů	69
6.3	Experiment věnovaný vlivu zdržení vozidel na křižovatce	72
7	Závěr	74
	Seznam použité literatury.....	76
	Seznam příloh.....	78

Seznam použitých značek a symbolů

a.s.	.....	Akciová společnost
α	.....	Hladina významnosti [-]
č.	.....	Číslo
ČSN	.....	Česká státní norma
D(X)	.....	Momentová charakteristika variability [-]
E(X)	.....	Momentová charakteristika polohy [-]
F(t)	.....	Distribuční funkce [-]
f(t)	.....	Hustota pravděpodobnosti [-]
FIFO	.....	Řádný frontový režim
CHIINV	.....	Funkce v programu Excel
i	.....	Index varianty
k	.....	Počet variant [-]
μ	.....	Střední hodnota, pro kterou se stanovuje odhad [-]
n	.....	Rozsah souboru [-]
NORMSINV	.....	Funkce v programu Excel
s	.....	Výběrová směrodatná odchylka [voz]
T _D	.....	Dolní mez konfidenčního intervalu [voz]
T _H	.....	Horní mez konfidenčního intervalu [voz]
TINV	.....	Funkce v programu Excel
TP	.....	Technické podmínky
n _i	.....	Pozorované četnosti
obr	.....	Obrázek
p _{jv}	.....	Počet jednotkových vozidel
v _i	.....	Varianta proměnné
x _{krit}	.....	Kritická hodnota testu
x _{obs}	.....	Pozorovaná hodnota testové statistiky
\bar{x}	.....	Výběrový průměr

1 Úvod

Téma dynamického řízení světelně řízené křižovatky jsem si zvolil z toho důvodu, že mě problematika řízení křižovatek zajímá a rád bych se tomuto tématu věnoval i v budoucím životě. Také jsem chtěl zkoumat, zda problém dynamického řízení křižovatky lze vyřešit pomocí simulačního nástroje Witness, s kterým jsme se seznámili během studia na VŠB – TUO.

V teoretické části se nejprve budu věnovat popisu křižovatky, budou vysvětleny některé ze základních pojmů věnující se křižovatkám, dále budou charakterizovány systémy řízení, které jsou aplikovány na křižovatkách, především použití dynamického řízení. Také se zaměřím na statistické metody, které v této práci budou využívány.

Část věnující se analýze dat bude předně zaměřena na provedení dopravní průzkum a zpracování údajů pro simulační model, které se pomocí dopravního průzkumu získaly. Na řešené křižovatce č. 3045 Plzeňská x Mitrovická nacházející se v okrajové části Ostravy je nutno zejména zjistit pomocí dopravního průzkumu jednotlivé intenzity vozidel, počet vozidel stojících ve frontě v jednotlivých řadících pružích a zjistit způsob řízení světelně řízené křižovatky. Zmíněné aspekty poslouží k vytvoření simulačního modelu v programu Witness – modelová část práce bude vysvětlovat prvky, proměnné a atributy, které budou použity na samotné sestavení modelu. Také bude popsána konstrukce dynamického řízení v jednotlivých součástech modelu, za jakých okolností bude prodloužen vozidlům v jednotlivých proudech křižovatky zelený signál dovolující vjezd vozidel do křižovatky.

Závěrečná část práce má za úkol srovnat hodnoty získané měřením s hodnotami získanými ze simulačního modelu a zjistit, zda vytvořený simulační model vykazuje dostatečnou míru shody s reálnou situací na řešené křižovatce. Rovněž jsou se simulačním modelem provedeny experimenty.

Cílem diplomové práce je prostřednictvím programu Witness vytvořit simulační model, který bude odpovídat dynamickému řízení světelně řízené křižovatky, a na základě získaných dat z provozu tento model validovat a provést vybrané experimenty.

2 Teoretická východiska pro řešení práce

Úvodní kapitola obsahuje pojem křižovatky, rozdělení křižovatek, bude vysvětlen význam značek v situačních plánech. Bude také vysvětleno, jaké způsoby řízení se užívají, co znamenají a na jaké bázi fungují detektory. V neposlední řadě budou popsány statistické metody, kterých bude v této práci užito.

2.1 Křižovatky

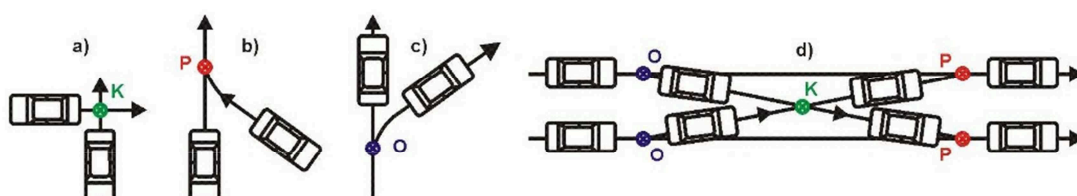
Křižovatkám a pojmům s tímto tématem souvisejících se detailněji věnují skripta [1] Křivda, V. Základy organizace a řízení silniční dopravy. V této podkapitole bude vypsáno několik základních pojmů.

„Křižovatka je místo, v němž se pozemní komunikace v půdorysném průmětu protínají nebo stýkají a alespoň dvě z nich jsou vzájemně propojeny. Za křižovatku se nepovažuje připojení lesních a polních cest, sjezdy k nemovitostem a připojení obslužných dopravních zařízení (čerpací stanice, parkoviště, apod.).“

„Křížení je místo, v němž se pozemní komunikace v půdorysném průmětu protínají, aniž jsou vzájemně propojeny, nebo místo, v němž se pozemní komunikace v půdorysném průmětu protíná s drážní komunikací (mimoúrovňové křížení dálnice se silnicí či polní cestou, železniční přejezdy, apod.).“

Na křižovatkách dochází ke křížování pohybu vozidel v tzv. kolizních bodech. Rozlišujeme kolizní body, viz obr. č. 2.1:

- křížné (a),
- přípojný (b),
- odbočný (c),
- průpleťový (d).



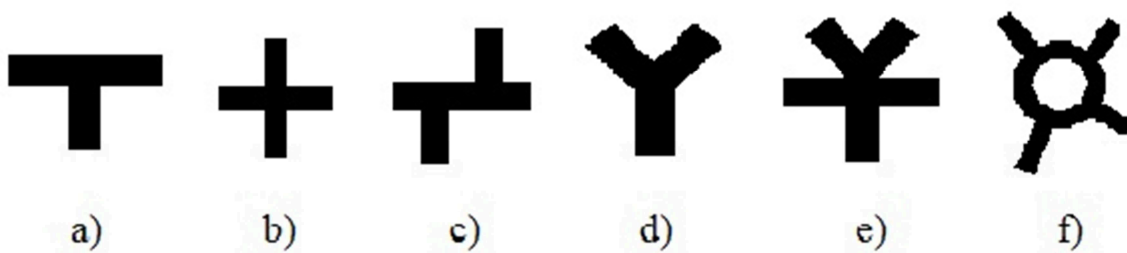
Obr. č. 2.1 Rozdělení kolizních bodů

Křižovatky lze rozdělit podle několika kritérií. Podle počtu úrovní, ve kterých se komunikace protínají, dělíme křižovatky na:

- křižovatky úrovnňové – styk křižujících se komunikací probíhá v jedné úrovni (mohou obsahovat křížné, odbočné, přípojně a průpletové kolizní body),
- křižovatky mimoúrovňové – pozemní komunikace se kříží na dvou či více úrovních (neobsahují křížné kolizní body),
- křižovatky kombinované – kombinace výše uvedených, mohou obsahovat křížné kolizní body.

Podle tvaru ramen, která se nacházejí na křižovatce, lze křižovatky rozlišit na:

- křižovatky stykové – tříramenná křižovatka ve tvaru písmene T (obr. č. 2.2 a),
- křižovatky průsečné – čtyřramenná křižovatka ve tvaru písmene X (obr. č. 2.2 b),
- křižovatky odsazené – čtyřramenná křižovatka s dvěma stykovými křižovatkami umístěné v určité vzdálenosti od sebe (obr. č. 2.2 c),
- křižovatky vidlicové – tříramenná křižovatka ve tvaru písmene Y (obr. č. 2.2 d),
- křižovatky hvězdicové – pěti a víceramenná křižovatka (obr. č. 2.2 e),
- křižovatka okružní – tři a víceramenná křižovatka se středním ostrovem kruhového tvaru (obr. č. 2.2 f).



Obr. č. 2.2 Rozlišení křižovek podle tvaru ramen

Z hlediska řízení světelným signalizačním zařízením na křižovatkách rozeznáváme:

- řízené křižovatky – provoz je řízen světelným signalizačním zařízením,
- neřízené křižovatky – přednost dána zákonem o provozu na pozemních komunikacích.

2.2 Značení pro situační plány světelné signalizace

Do situačních plánů se příslušné zařízení potřebné k řízení světelným signalizačním zařízením zakresluje smluvenými značkami podle ČSN 73 6021 [2]. Níže budou vykresleny (viz tabulka 2.1) některé ze značek nacházející se v situačním schématu zakresleném na str. 25.

Tabulka č. 2.1 Značky pro situační plány

Značka	Popis značky
	Stožár světelné signalizace
	Výložník
	Řadič
	Detektor
	Návěstidlo pro vozidla
	Návěstidlo se směrovým signálem
	Návěstidlo doplňkové zelené šipky
	Návěstidlo signálu pro opuštění křižovatky
	Návěstidlo žlutého světla ve tvaru chodce

2.3 Systémy řízení

Systém řízení definuje průběh provozu světelného signalizačního zařízení. Při rozhodovacím procesu, jaké řízení na dané křižovatce použít, hraje významnou roli množství vozidel projíždějících křižovatkou, stavební uspořádání křižovatky a přilehlých komunikací a další aspekty ovlivňující chování vozidel na křižovatce.

Způsoby světelného řízení dopravy na křižovatkách lze členit na řízení:

- pevné,
- dynamické.

Pevné řízení provozu je založeno na konstantní délce cyklu při určitém časovém období. Takto upravené řízení počítá s ustálenými intenzitami, na neobvyklé situace (např. tvořící se kolony na určitém rameni křižovatky) není schopno pevné řízení pružně zareagovat. Pevné řízení se také používá jako záložní způsob v dynamickém řízení, dojde-li k poruše detekce vozidel.

Dynamické řízení – uplatnění tohoto řízení je účelné např. v situaci, kdy se v určitém dopravním proudu nenachází žádné vozidlo, ani žádné nepříjíždí a pro tento proud by byla uplatněna návěst volno. Dynamické řízení dokáže pružně zareagovat na vzniklou situaci vytvořením návěsti zakazující vjezd vozidel do křižovatky a efektivně zlikvidovat neproduktivní dobu tím, že neobsazenému dopravnímu proudu signál volno zkrátí na minimální stanovenou dobu a umožní vozidlům nacházejícím se v další fázi cyklu vjet do křižovatky na signál volno.

Zelený signál pro určitý proud může být zkrácen ve prospěch různého dopravního proudu či ve prospěch (zkrácení) délky cyklu. Také může být naopak prodloužen na úkor jiného dopravního proudu anebo na úkor (prodloužení) délky cyklu.

Při přizpůsobení délky zeleného signálu měřením časové mezery jsou prostřednictvím detektoru na příjezdu ke křižovatce měřeny časové mezery mezi příjezdy vozidel za sebou v jednotlivých proudech. Doba zeleného signálu je po ukončení vybrané minimální délky zelené přizpůsobena aktuálním požadavkům přijíždějících vozidel. Zelený signál bývá prodlužován na takovou dobu, až naměřená časová mezera dosáhne předem stanovené hodnoty anebo je dosaženo nejdelší stanovené doby volna. Podle TP 81 [2] je za hodnotu časové mezery pro ukončení zeleného signálu možno považovat čas mezi 2 s až 5 s. Časové mezery 5 s a výše jsou uvažovány pouze ve výjimečných situacích, např. při nepříznivých sklonových poměrech na křižovatce, při vysokém podílu nákladních vozidel. Na křižovatkách s velkými intenzitami při pozitivní skladbě dopravního proudu se tato hodnota pohybuje v rozmezí 2 s až 4 s.

Při řídicím způsobu vkládání fáze na výzvu je vsunuta do určitého sledu fází jiná fáze tak, aby mohla vozidla, která se nacházejí např. v málo vytížených odbočných pruzích, projet danou křižovatkou. Kdyby těmto vozidlům bylo umožněno trvalé projetí, mohly by vznikat neefektivní ztráty, které by mohla využít vozidla v jiných proudech, či by byla

zkrácena doba cyklu. Vozidlům nacházejícím se v proudech na výzvu bývá zpravidla indukční smyčka umístěna těsně před stopčárou [2].

2.4 Detektory

Ke sledování aktuální dopravní situace v daném místě se v silniční dopravě užívají technická zařízení – detektory. Pomocí těchto zařízení je možno zajistit dynamické a strategické řízení dopravy a také získat dopravní informace pro zamýšlené účely.

Detekce má za úkol rozpoznat přítomnost vozidel (či jiných zkoumaných prvků) v detekčních zónách. Detektory napomáhají k získání dopravních parametrů a informací ovlivňující řízení a organizování dopravy. Jedná se například o intenzitu dopravního proudu, rychlost vozidel nebo obsazenost jízdních pruhů. Díky nabytým informacím lze předpovídat například cestovní časy vozidel nebo optimalizaci řízení dopravních toků, což vede k zefektivnění provozu a následně ke snížení či eliminaci dopravních kongescí během špičkových hodin.

V praxi existuje několik druhů detektorů, jedná se o indukční smyčky, videodetekce a mikrovlnné detektory, dále také infračervené, laserové a ultrazvukové detektory. Na zkoumané křižovatce se nachází indukční smyčky, v textu bude dále popsáno, na jaké bázi pracují.

Indukční smyčky pracují na principu změny indukčnosti smyčky, jež je umístěna pod povrchem pozemní komunikace. Detektor je složen z vodiče tvořícího samotnou smyčku, impedančního transformátoru a detektoru v řadiči.

Změna indukčnosti je způsobena přejetím vozidla přes smyčku, následně je zanesena přes impedanční transformátor ve vyhodnocovacím zařízení a předána ke zpracování. Sledovaný dopravní ukazatel a způsob řízení dopravy na křižovatce ovlivňují velikost, polohu a tvar smyčky. Detekce přítomnosti vozidel pomocí indukčních smyček je citlivá a spolehlivá. Hodnoty a parametry nabyté touto detekcí jsou důvěryhodným zdrojem pro ovlivňování a řízení provozu na pozemních komunikacích, zvláště pak na křižovatkách se světelným signalizačním zařízením [3].

2.5 Testování statistických hypotéz

Teoretické základy probíraného problému podrobněji vysvětlují materiály „Testování hypotéz“ [4]. V diplomové práci bude testováno, zda se počet přijíždějících vozidel ke

křížovatelce řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti, proto bude níže vysvětleno několik základních pojmů zabývajících se tímto problémem.

Testování statistických hypotéz umožňuje zhodnotit, zda data získaná pomocí experimentu nepopírají předpoklad, který jsme před provedením testování provedli. Rozlišujeme dva typy statistických hypotéz – parametrické hypotézy a neparametrické hypotézy.

Parametrická hypotéza je hypotéza o parametrech základního souboru, zde patří:

- hypotéza o parametru jedné populace (střední hodnota, rozptyl, medián,...),
- hypotéza o parametrech dvou populací (srovnávací testy),
- hypotéza o parametrech tří a více populací (Kruskalův test, Wallisův test,...).

Neparametrická hypotéza je hypotéza o jiných vlastnostech základního souboru (typ rozdělení náhodné veličiny, hypotézy o závislosti náhodné veličiny atd.).

Testování hypotéz je proces, kde proti sobě stojí nulová a alternativní hypotéza.

Nulová hypotéza H_0 :

Nulová hypotéza vyjadřuje náš předpoklad, který chceme testovat. Pravdivost nulové hypotézy nelze na základě dat dokázat. Pravdivost nulové hypotézy lze na základě dat pouze vyvrátit.

Alternativní hypotéza H_A :

Vyjadřuje, co platí v případě, že zamítneme nulovou hypotézu. Alternativní hypotéza se dá rozdělit podle hledisek:

- a) levostranná alternativní hypotéza,
- b) pravostranná alternativní hypotéz,
- c) oboustranná alternativní hypotéza.

Při testování hypotéz může dojít ke čtyřem případům, viz tabulka č. 2.2, která je uvedena na následující straně práce.

Tabulka 2.2 Možné výsledky testování hypotéz

		Výsledek testu	
		Platí H_0	Platí H_A
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost: $1 - \alpha$	Chyba I. druhu Pravděpodobnost: α
	Platí H_A	Chyba II. druhu Pravděpodobnost: β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost: $1 - \beta$

Samozřejmě je žádoucí, abychom měli co největší sílu testu $1 - \beta$ s co nejmenší hladinou významnosti α . Jelikož to jsou dva protichůdné požadavky, tak toho není možné docílit. Při testování statistických hypotéz se obvykle hodnota α volí $\alpha = 0,05$ (respektive 0,01). Chybu II. lze ovlivnit volbou vhodného testu nebo zvětšením rozsahu výběrového souboru.

Klasický test hypotéz se člení do několika fází:

- formulace nulové a alternativní hypotézy,
- volba testové statistiky a jejího rozdělení při platnosti nulové hypotézy (tzv. nulové rozdělení). Testová statistika a její nulové rozdělení je dána pro konkrétní test,
- sestrojení kritického oboru a oboru přijetí,
- obor všech možných hodnot testové statistiky rozdělíme na dva disjunktní obory – obor přijetí (takové hodnoty testové statistiky svědčící pro nezamítnutí nulové hypotézy) a kritický obor (takové hodnoty testové statistiky, které svědčí pro zamítnutí nulové hypotézy). Hranice mezi obory se nazývá kritická hodnota testu (x_{krit}). Kritický obor je tak velký, aby pravděpodobnost, že testová statistika leží v kritickém oboru při předpokladu platnosti nulové hypotézy, byla rovna α ,
- výpočet pozorované hodnoty testové statistiky x_{obs} ,
- formulace závěru testu:
 - leží-li x_{obs} v oboru přijetí, potom nezamítáme nulovou hypotézu,
 - leží-li x_{obs} v kritickém oboru, potom zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotézy.

Testů statistických hypotéz existuje celá řada. V této práci bude test zaměřen na otestování toho, zda data získaná náhodným výběrem pocházejí z populace řídící se určitým teoretickým rozdělením s příslušnými parametry. K tomuto slouží Pearsonův χ^2 test dobré shody.

Tento test slouží k testování nulové hypotézy v obecném tvaru:

- náhodný výběr pochází z konkrétního rozdělení pravděpodobnosti s konkrétními parametry.

Alternativní hypotéza neguje nulovou hypotézu:

- náhodný výběr nepochází z konkrétního rozdělení pravděpodobnosti s konkrétními parametry.

Neznáme-li parametry příslušného rozdělení, je nutno jej na základě náhodného výběru odhadnout, např. pomocí metody maximální věrohodnosti.

Pro testovou statistiku platí:

$$G = \sum_{k=1}^k \frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}} \rightarrow \chi^2_{k-h-1}, \quad (2.1)$$

kde:

k = počet tříd,

n = rozsah souboru,

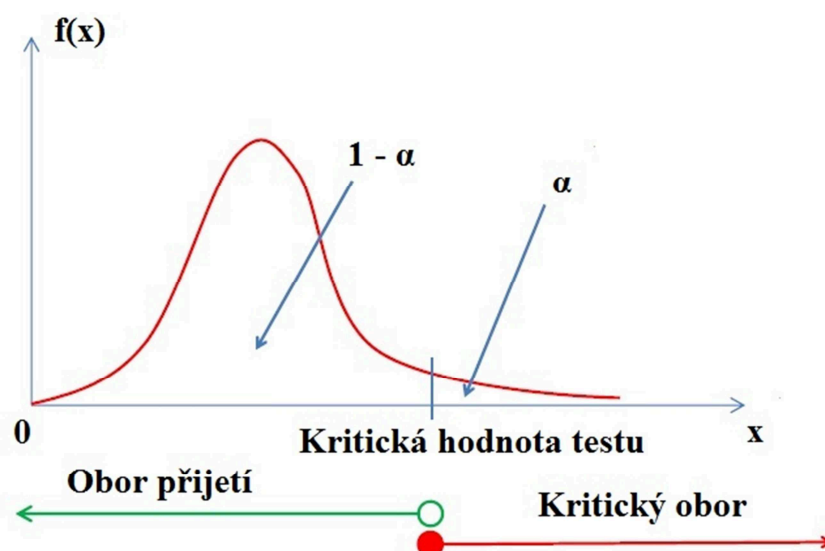
n_i = počet pozorování v i – té třídě (pozorované četnosti),

$n \cdot \pi_{0,i}$ = teoretické četnosti,

h = počet odhadovaných parametrů rozdělení.

Aby bylo nulové rozdělení dobře aproximováno rozdělením χ^2 , je třeba, aby byly teoretické četnosti ve všech třídách větší než 5. Není-li tento předpoklad pro všechny třídy splněn, je nutno příslušné třídy vhodně sloučit (toto má za následek pokles stupňů volnosti rozdělení χ^2).

Na obr. č. 2.3 je zpracován graf zobrazující kritický obor a obor přijetí pro Pearsonův χ^2 test dobré shody.



Obr. č. 2.3 Sestrojení oboru přijetí a kritického oboru

2.6 Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti

Jedná se o diskrétní rozdělení pravděpodobnosti, Poissonův proces vyjadřuje počet výskytů nějakého jevu v jevovém prostoru. Má jeden parametr $\lambda > 0$ (vyjadřuje počet výskytů události za jednotku času).

Pravděpodobnostní funkce je definována pomocí vztahu:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}; \lambda > 0; k \in \mathbb{Z}_0^+, \quad (2.2)$$

$$P(X = k) = 0; \text{ jinde.} \quad (2.3)$$

Poissonovo rozdělení lze popsat několika číselnými charakteristikami, nejčastěji je uváděna střední hodnota a rozptyl, které se spočítají podle následujících vztahů:

Střední hodnota $E(X)$ je momentová charakteristika polohy a je definována podle vztahu:

$$E(X) = \lambda. \quad (2.4)$$

Rozptyl $D(X)$ je momentová charakteristika variability a je definována vztahem:

$$D(X) = \lambda. \quad (2.5)$$

Odhad parametru λ je definován pomocí metody maximální věrohodnosti:

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k v_i \cdot n_i, \quad (2.6)$$

kde:

n = rozsah souboru,

k = počet variant,

i = index varianty,

v_i = varianta proměnné i ,

n_i = pozorovaná četnost i .

Za Poissonův vstupní tok se považuje každý vstupní tok, který splňuje 3 základní vlastnosti:

- a) stacionárnost – tok je stacionární tehdy, jestliže pravděpodobnost výskytu k událostí za čas t závisí pouze na t ,
- b) beznáslednost – tok je beznásledný, jestliže počet událostí, které nastanou v intervalu délky t , nezávisí na počtu událostí, které nastaly do začátku tohoto intervalu,
- c) ordinárnost – tok je ordinární, jestliže např. zákazníci přicházejí po jednom, pravděpodobnost příchodu více než jednoho zákazníka ve stejný okamžik je nulová [5].

2.7 Exponenciální rozdělení

Z literatury [6] budou vypsány následující pojmy. Jedná se o spojité rozdělení pravděpodobnosti. Exponenciální rozdělení bude modelovat mezery mezi příjezdy vozidel. Toto rozdělení se pojí s Poissonovým rozdělením. Exponenciální rozdělení se používá k popisu doby mezi výskyty příslušných událostí, je popsáno hustotou pravděpodobnosti a distribuční funkcí. Má jeden parametr – $\lambda > 0$.

Hustota pravděpodobnosti je definována pomocí vztahu:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; t > 0; \lambda > 0, \quad (2.7)$$

$$f(t) = 0; \text{ jinde.} \quad (2.8)$$

Distribuční funkce je definována vztahem:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}; t > 0; \lambda > 0, \quad (2.9)$$

$$F(t) = 0; \text{ jinde.} \quad (2.10)$$

Exponenciální rozdělení lze popsat několika číselnými charakteristikami, nejčastěji je uváděna střední hodnota a rozptyl, které se spočítají podle následujících vztahů:

Střední hodnota $E(X)$ je momentová charakteristika polohy a je definována pomocí vztahu:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.11)$$

Rozptyl $D(X)$ je momentová charakteristika variability a je definována vztahem:

$$D(X) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (2.12)$$

2.8 Odhady parametrů základního souboru

Parametry náhodného výběru jsou náhodné proměnné řídící se výběrovým rozdělením. Je-li známo pro určitou výběrovou charakteristiku výběrové rozdělení, lze odhadnout parametr celé populace.

Rozeznáváme dva typy odhadů:

- a) bodový odhad – parametr populace se aproximuje jediným číslem,
- b) intervalový odhad – parametr populace se aproximuje intervalem, v němž příslušný populační parametr s vysokou pravděpodobností leží.

Jelikož bude v diplomové práci pracováno s intervalovými odhady, bude následující část práce věnována základním pojmům vysvětlující tento typ úlohy.

Intervalový odhad

Interval, který hledáme, se nazývá interval spolehlivosti (konfidenční interval). Spolehlivost odhadu se označuje $1 - \alpha$, kde α reprezentuje hladinu významnosti. Zpravidla se volí hladina významnosti $\alpha = 0,05$ nebo $\alpha = 0,01$. S rostoucí spolehlivostí odhadu roste i šířka intervalu spolehlivosti.

Rozlišujeme dolní mez konfidenčního intervalu T_D a horní mez konfidenčního intervalu T_H . Intervalový odhad lze rozčlenit:

- a) levostranný interval spolehlivosti:

$$P(\theta \geq T_D) = 1 - \lambda, \quad (2.13)$$

- b) pravostranný interval spolehlivosti:

$$P(\theta < T_H) = 1 - \lambda, \quad (2.14)$$

c) oboustranný interval spolehlivosti:

$$P(T_D \leq \theta < T_H) = 1 - \alpha. \quad (2.15)$$

Intervalový odhad střední hodnoty

Rozeznáváme dva případy:

- a) je známa směrodatná odchylka σ normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr,
- b) není známa směrodatná odchylka σ normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr.

V prvním případě se náhodná proměnná „Z“ řídí normovaným rozdělením pravděpodobnosti a platí pro ni, že:

$$Z = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma} \cdot \sqrt{n} \rightarrow N(0,1), \quad (2.16)$$

kde:

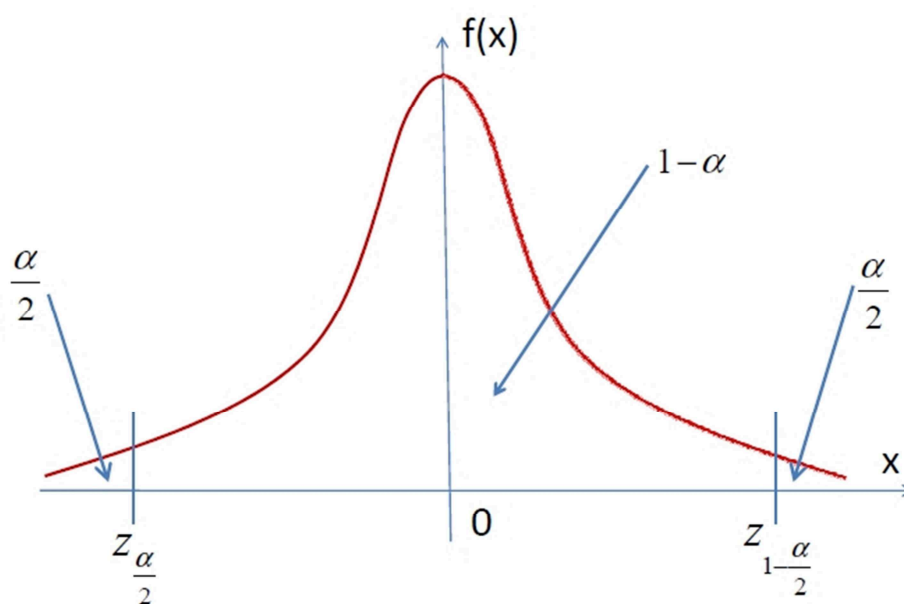
\bar{x} – výběrový průměr,

μ – střední hodnota, pro kterou se stanovuje odhad,

σ – směrodatná odchylka,

n – rozsah souboru.

Na obr. č. 2.4 lze vidět oboustranný interval spolehlivosti.



Obr. č. 2.4 Oboustranný interval spolehlivosti pro známou směrodatnou odchylku

Dolní mez konfidenčního intervalu se vypočítá podle vztahu:

$$T_D = \bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}}. \quad (2.17)$$

Horní mez konfidenčního intervalu se vypočítá podle vztahu:

$$T_H = \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}}. \quad (2.18)$$

Hodnota kvantilu normovaného rozdělení se získá buď pomocí statistických tabulek anebo pomocí funkce v Excelu NORMSINV:

$$z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \text{NORMSINV}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right). \quad (2.19)$$

V druhém případě známe náhodný výběr o rozsahu n a s průměrem \bar{x} pocházející z normálního rozdělení a neznámým rozptylem. Testová statistika se řídí Studentovým rozdělením pravděpodobnosti s $n - 1$ stupni volnosti a platí:

$$T_{n-1} = \frac{\bar{x} - \mu}{s} \cdot \sqrt{n} \rightarrow t_{n-1}, \quad (2.20)$$

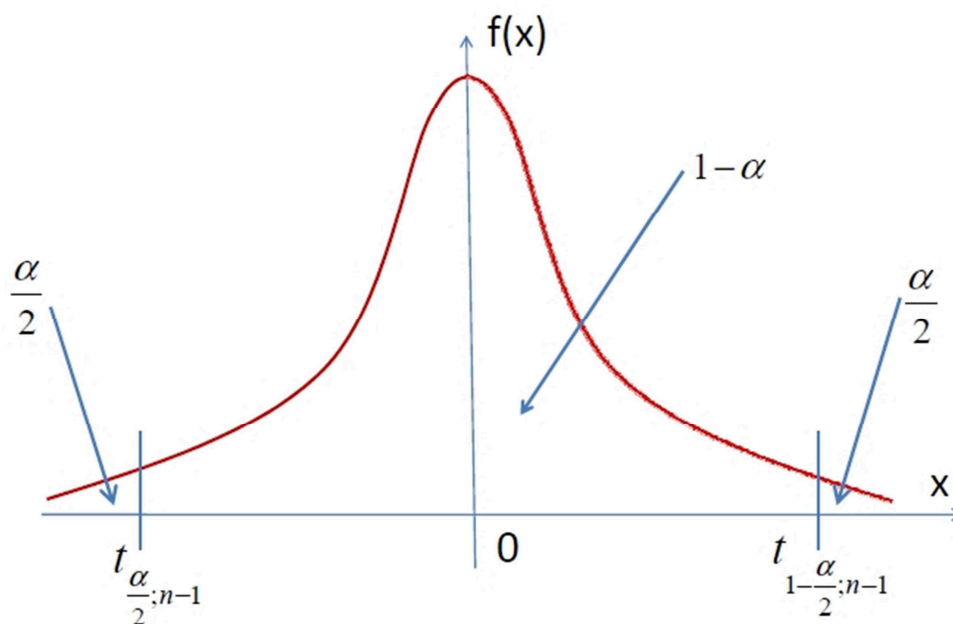
kde:

\bar{x} – výběrový průměr,

μ – střední hodnota, pro kterou se stanovuje odhad,

s – výběrová směrodatná odchylka,

n – rozsah souboru.



Obr. č. 2.5 Oboustranný interval spolehlivosti pro neznámou směrodatnou odchylku

Dolní mez konfidenčního intervalu se vypočítá podle vztahu:

$$T_D = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}. \quad (2.21)$$

Horní mez konfidenčního intervalu se vypočítá podle vztahu:

$$T_H = \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}. \quad (2.22)$$

Hodnota kvantilu Studentova rozdělení se získá buď pomocí statistických tabulek anebo pomocí funkce v Excelu TINV:

$$t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1} = TINV(\alpha; n-1). \quad (2.23)$$

Jestliže máme k dispozici náhodný výběr velkého rozsahu (uvádí se $n \geq 30$) a neznáme směrodatnou odchylku normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr, lze Studentovo rozdělení aproximovat normovaným rozdělením, tzn., že $s = \sigma$ [7].

3 Analýza dat potřebných pro simulaci

Kapitola se zaměřuje na analýzu vybrané křižovatky, v textu práce bude popsáno, kde se křižovatka nachází a bude stručně popsána charakteristika vybrané křižovatky. Dále je tato kapitola zaměřena na zpracování dopravního průzkumu a data, která byla ze zmíněného průzkumu získána.

3.1 Lokalita křižovatky

Řešená křižovatka č. 3045 leží na rozmezí obvodu Nová Bělá a Stará Bělá v Ostravě. Jedná se o křižovatku, jež křižuje místní pozemní komunikaci první třídy I/58 Plzeňská, která pokračuje z centra Ostravy do Krmelína, Mošnova a místní pozemní komunikaci druhé třídy II/478 Mitrovická, která spojuje obvody Nové Bělé a Staré Bělé. Na obr. č. 3.1 je zobrazena daná křižovatka.



Obr. č. 3.1 Umístění křižovatky [8]

V křižovatce se střetávají čtyři komunikace:

- ulice Plzeňská (od severu),
- ulice Mitrovická (od východu),
- ulice Plzeňská (od jihu),
- ulice Mitrovická (od západu).

Na obr. č. 3.2 lze vidět situační schéma [9] řešené křižovatky.



3.2 Charakteristika ramen křižovatky

Charakteristika křižovatky byla převzata a upravena z bakalářské práce [10], kde byla jednotlivá ramena křižovatky popsána.

Hlavní pozemní komunikace Plzeňská ve směru od centra do Krmelína viz obr. č. 3.3 a obr. č. 3.4 je rozčleněna do dvou jízdních pruhů. Pruh umožňující jízdu po ulici Plzeňská směr Krmelín je označen v situačním schématu symbolem „VA“. Tento pruh také umožňuje přijíždějícím vozidlům odbočit vpravo na ulici Mitrovická, která pokračuje do Staré Bělé. K odbočení vlevo do Nové Bělé na ulici Mitrovická slouží jízdní pruh označený „VE“.

Na zdejší rameni se světelné signalizační zařízení skládá z jednoho výložníku, který je opatřen šesti návěstidly. Pro proud „VA“ slouží dvě návěstidla, zobrazující tříbarevné signály se směrovými šipkami a zároveň pro odbočující vozidla slouží dvě návěstidla, která upozorňují odbočující vozidla jedoucí směr Stará Bělá na souběžně přecházející chodce. Zbylá dvě návěstidla se směrovými šipkami využívají vozidla v proudu „VE“, která odbočují vlevo. Jelikož se jedná o hlavní pozemní komunikaci, je výložník osazen svislou dopravní značkou – Hlavní pozemní komunikace (P2).



Obr. č. 3.3 Pohled na rameno od centra



Obr. č. 3.4 Čekající vozidlo na rameni od centra

Vedlejší pozemní komunikace Mitrovická ze směru Nová Bělá se skládá ze tří jízdních pruhů. Rameno křižovatky je zobrazeno na obr. č. 3.5 a obr. č. 3.6. Pro odbočení vpravo směr ulice Plzeňská do centra vozidla používají pruh označený symbolikou „*VBJ*“. Vozidla jedoucí přímo po ulici Mitrovická do Staré Bělé využívají řadící proud „*VB*“. Jízdní pruh označený „*KB*“ slouží pro vozidla odbočující na ulici Plzeňskou, která pokračuje směr Krmelín. Vozidla, která vjíždí do křižovatky z výše uvedeného pruhu, musí dávat dle zákona o pravidlech silničního provozu přednost protijedoucím vozidlům z proudu označeného „*VDI*“, která směřují do Nové Bělé.

Na tomto rameni se nacházejí dva výložíky. První z nich slouží pro proud „*VJ*“ a je opatřen návěstidlem zobrazujícím tříbarevné signály s plnými kruhovými světly a návěstidlem pro zobrazení signálu doplňkové zelené šipky. Druhý výložík, sloužící společně pro proudy „*VB*“ a „*KB*“ zobrazuje tříbarevné signály s plnými kruhovými světly. Pro odbočující vozidla z proudu „*KB*“ slouží také signál pro opuštění křižovatky umístěný v protilehlém rohu křižovatky. U obou výložíků se nachází také svislá dopravní značka upravující přednost v jízdě – Stůj, dej přednost v jízdě (P6).



Obr. č. 3.5 Fronta čekajících vozidel od Nové Bělé



Obr. č. 3.6 Pohled na rameno od Nové Bělé

Hlavní pozemní komunikace Plzeňská směr centrum je zobrazena na obr. č. 3.7 a obr. č. 3.8. Skládá se ze dvou jízdních pruhů označených v situačním schématu symboly „VC“ a „VG“. Pro odbočení vlevo je vyhrazen pruh „VG“. Dopravní proud „VC“ dovoluje vozidlům pokračovat po ulici Plzeňská směr centrum a zároveň přijíždějícím vozidlům

umožňuje odbočit na ulici Mitrovická, která pokračuje do Nové Bělé. Pro odbočení vlevo slouží proud „VG“. Tento proud odbočuje na ulici Mitrovická pokračující do Staré Bělé.

Výložník se na tomto rameni skládá ze čtyř návěstidel. Dvě návěstidla slouží pro odbočující vozidla z proudu „VG“, zbylá dvě návěstidla využívají vozidla jedoucí v pruhu „VC“. Všechna návěstidla pro zdejší rameno křižovatky jsou opatřena signály tříbarevné soustavy s plnými kruhovými světly. Výložník je rovněž opatřen svislou dopravní značkou upravující přednost – Hlavní pozemní komunikace (P2).



Obr. č. 3.7 Přijíždějící vozidla ke křižovatce od Krmelína



Obr. č. 3.8 Plzeňská od Krmelína

Vedlejší pozemní komunikace Mitrovická ve směru ze Staré Bělé dovoluje jízdu třemi směry. Jízdní pruh nesoucí označení „VD1“ slouží pro vozidla jedoucí po ulici Mitrovická do Nové Bělé. Dále tento pruh umožňuje jízdu vpravo na ulici Plzeňská pokračující na Krmelín. Vozidla jedoucí do centra po ulici Plzeňská využívají druhý pruh, který je v situačním schématu označen symboly „VD2“. Tyto vozidla musí rovněž dávat ze zákona o pravidlech silničního provozu přednost protijedoucím vozidlům ze směru Nová Bělá, která pokračují po ulici Mitrovická do Staré Bělé.

Výložník nacházející se na zdejšího rameni využívá tří návěstidel. Pro oba přijíždějící proudy slouží signály tříbarevné soustavy, kterými jsou opatřena dvě návěstidla, třetí návěstidlo reprezentuje signál pro opuštění křižovatky sloužící pro vozidla odbočující vpravo směr Krmelín. Jedná se o vedlejší pozemní komunikaci, tudíž je výložník ještě osazen svislou dopravní značkou upravující přednost v jízdě – Stůj, den přednost v jízdě (P6). Pohled na rameno křižovatky lze spatřit na obr. č. 3.9 a obr. č. 3.10.



Obr. č. 3.9 Pohled na řadící pruhy od Staré Bělé



Obr. č. 3.10 Mitrovická od Staré Bělé

3.3 Údaje zjištěné dopravním průzkumem

V následující části práce bude popsáno a vysvětleno, jaké veličiny se v rámci provedeného průzkumu zjišťovaly a k čemu budou následně použity. Pro potřeby diplomové práce byl proveden dopravní průzkum za účelem:

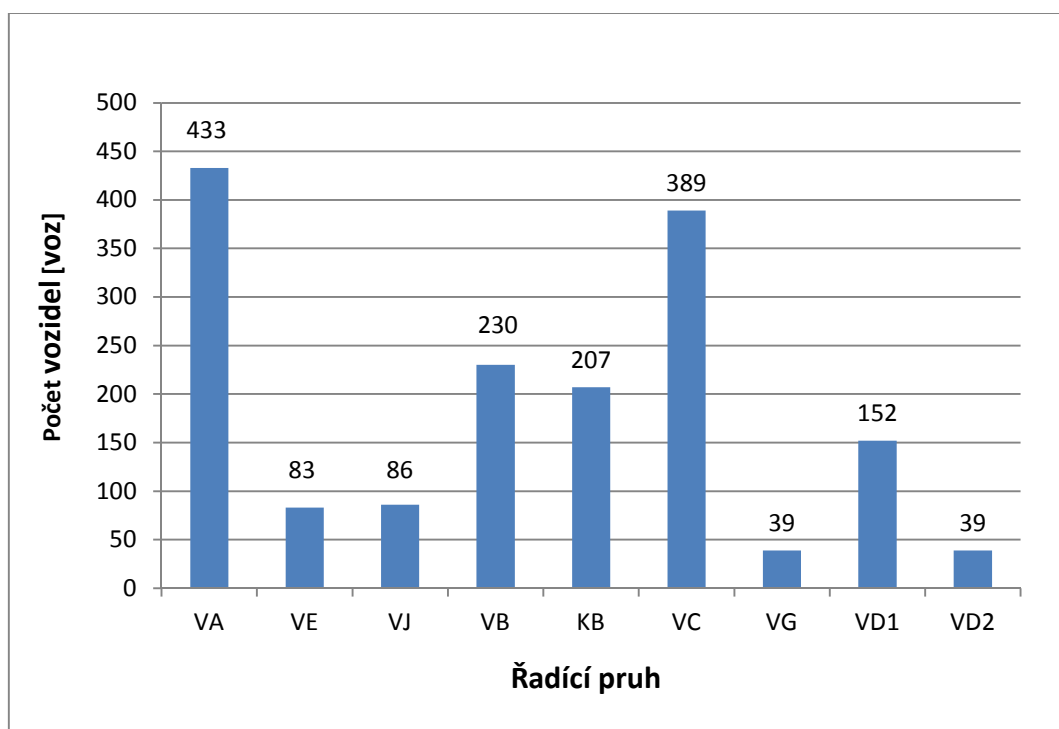
- zjištění intenzit vozidel pro jednotlivé řadící pruhy (rovněž zjištění intenzit vozidel v jednotlivých ramenech),
- zjištění skladby dopravních proudů,
- stanovení počtu vozidel ve frontě,
- zjištění způsobu řízení křižovatky,
- zjištění vzdáleností dopravních detektorů od stopčáry.

Jednotlivé hodnoty se zjišťovaly pomocí kamerového záznamu a vlastním měřením. Průzkum nebyl ovlivněn dopravní nehodou, opravnými pracemi v okolí křižovatky ani jinými neočekávanými negativními vlivy. Kamerový záznam řešené křižovatky byl poskytnut magistrátem města Ostravy, odborem dopravy, oddělení silnic, mostů, rozvoje a organizace dopravy [11].

3.3.1 Zjištění intenzit vozidel pro jednotlivé řadící pruhy

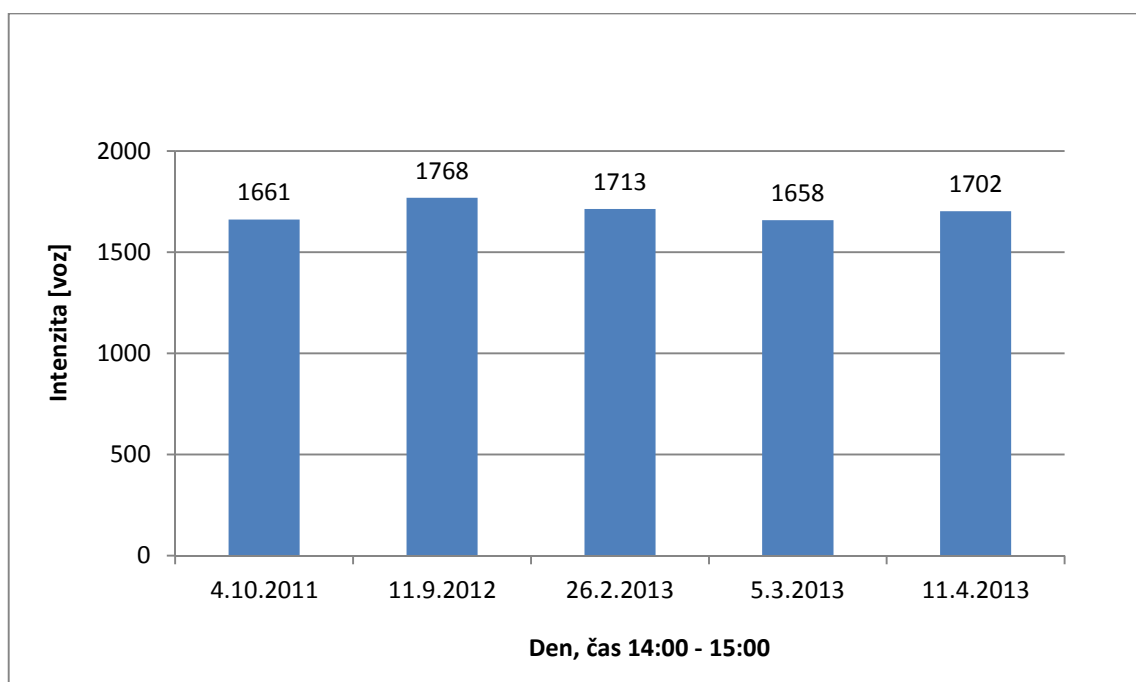
Z kamerového záznamu se nejdříve zjišťovaly intenzity pro všech devět řadících pruhů. Dále bylo zkoumáno, zda se počet příjezdějících vozidel k jednotlivým ramenům řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Z této hypotézy se následně bude vycházet v modelu, kde se příjezdějící vozidla budou řídit patřičnými vlastnostmi vycházející právě z daného rozdělení.

Průzkum probíhal v úterý 5. 3. 2013 v době od 14:00 do 15:00. Intenzity se zapisovaly do měřících archů v intervalech jedné minuty po dobu 60 minut. Tabulka s těmito intenzitami je zpracována v příloze A. Výsledné intenzity pro jednotlivé řadící pruhy byly zpracovány do grafu, který znázorňuje obr. č. 3.11.



Obr. č. 3.11 Výsledné intenzity pro jednotlivé řadící pruhy

V grafu na obr. č. 3.12 lze vidět srovnání jednotlivých intenzit příjezdějících vozidel v určitých dnech. Srovnání bylo provedeno z důvodu nedodržení doporučení pro dobu měření dopravního průzkumu podle TP189 [12]. Lze vypořádat, že naměřené intenzity se nijak výrazně neliší od zbylých intenzit zjištěných v jiných dnech z indukčních smyček. Tudíž bylo rozhodnuto, že měření ze dne 5. 3. 2013 je vyhovující pro potřeby této práce. Data z indukčních smyček byla poskytnuta společností Ostravské komunikace, a. s. [9], k nahlédnutí jsou zpracována v příloze B.



Obr. č. 3.12 Srovnání intenzit v určitých dnech

Ověření Poissonova rozdělení pravděpodobnosti

Pomocí Pearsonova χ^2 testu dobré shody bude ověřeno, zda se počet vozidel přijíždějících v jednotlivých ramenech křižovatky za minutu řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti či nikoliv. Níže v práci budou provedeny výpočty pro všechna ramena křižovatky.

Při dopravním průzkumu byly sledovány počty přijíždějících vozidel za 1 minutu. Za 60 minut přijelo celkem 1658 vozidel. Na hladině významnosti 0,05 bude testována hypotéza, zda se počet přijíždějících vozidel za minutu řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Tabulky s naměřenými četnostmi jsou uvedeny v počtu přijíždějících vozidel (tabulka 3.1, tabulka 3.4, tabulka 3.7, tabulka 3.10).

Rameno křižovatky od centra („VA“, „VE“):

Tabulka 3.1: Četnosti pro proud od centra

voz/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
n_i	0	1	0	4	2	6	6	5	6	7	6	4	6	1	2	3	0	0	0	0	0	1

Ke specifikaci nulové a alternativní hypotézy je nejdříve třeba odhadnout na základě výběru neznámý parametr Poissonova rozdělení λ . Neznámý parametr λ se odhadne jako aritmetický průměr všech pozorování:

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k v_i \cdot n_i$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 4 + \dots + 21 \cdot 1)$$

$$\hat{\lambda} \cong 8,60 \text{voz/min.}$$

Formulace nulové a alternativní hypotézy:

Nulová hypotéza: počet příjezdějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od centra řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,60$.

Alternativní hypotéza je negací nulové hypotézy, z toho plyne: počet příjezdějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od centra neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,60$.

Pro testovou statistiku platí:

$$G = \sum_{k=1}^k \frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}} \rightarrow \chi^2_{k-h-1}.$$

Pozorované četnosti jsou známy, zbývá stanovit teoretické pravděpodobnosti $\pi_{0,i}$ a teoretické četnosti $n \cdot \pi_{0,i}$. Vypočítané hodnoty udává tabulka 3.2, která je zpracována na následující straně diplomové práce.

Tabulka 3.2 Stanovení teoretické prst. a teoretické četnosti pro proud od centra

Index varianty	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická pravděpodobnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	0	0,0002	0,0110
2	1	1	0,0016	0,0950
3	2	0	0,0068	0,4085
4	3	4	0,0195	1,1710
5	4	2	0,0420	2,5177
6	5	6	0,0722	4,3304
7	6	6	0,1034	6,2069
8	7	5	0,1271	7,6257
9	8	6	0,1366	8,1976
10	9	7	0,1306	7,8332
11	10	6	0,1123	6,7366
12	11	4	0,0878	5,2668
13	12	6	0,0629	3,7745
14	13	1	0,0416	2,4970
15	14	2	0,0256	1,5339
16	15	3	0,0147	0,8794
17	16	0	0,0079	0,4727
18	17	0	0,0040	0,2391
19	18	0	0,0019	0,1142
20	19	0	0,0009	0,0517
21	20	0	0,0004	0,0222
22	21 a více	1	0,0002	0,0091
Σ		60	1	60

Vzorové příklady výpočtu pro první a druhý index varianty teoretických pravděpodobností $\pi_{0,i}$, které se vypočítají dosazením do pravděpodobnostní funkce:

$$\pi_{0,1} = P(X = 0) = \frac{8,60^0}{0!} \cdot e^{-8,60}$$

$$\pi_{0,1} \doteq 0,0002,$$

$$\pi_{0,2} = P(X = 1) = \frac{8,60^1}{1!} \cdot e^{-8,60}$$

$$\pi_{0,2} \doteq 0,0016.$$

Než se přistoupí k výpočtu pozorované hodnoty testové statistiky, je třeba zkontrolovat, zda jsou všechny teoretické četnosti větší než 5. Jelikož tuto podmínku

všechny teoretické četnosti v tabulce nesplňují, je nutno jednotlivé varianty sloučit. Prvních 6 tříd z předešlé tabulky je sloučeno do třídy 1 následující tabulky. Bývalé třídy 13 až 22 jsou sloučeny do nově vzniklé třídy 8. Nově vzniklé sloučení lze vidět v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Hodnoty po sloučení pro rameno od centra

Varianta	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
1	13	8,5337	2,3376
2	6	6,2069	0,0069
3	5	7,6257	0,9041
4	6	8,1976	0,5891
5	7	7,8332	0,0886
6	6	6,7366	0,0805
7	4	5,2668	0,3047
8	13	9,5939	1,2092
Σ	60	60	5,5208

Nyní je možné přistoupit k výpočtu pozorované hodnoty testové statistiky. Jednotlivé hodnoty testové statistiky jsou uvedeny v posledním sloupci tabulky. Pozorovaná hodnota testové statistiky se poté získá jako součet všech těchto hodnot. Z tabulky je patrné, že pozorovaná hodnota testové statistiky $X_{\text{obs}} = 5,5208$.

Získanou hodnotu testové statistiky je nutno porovnat s kritickou hodnotou testu. Kritická hodnota testu je rovna 95% kvantilu χ^2 rozdělení s počtem stupňů volnosti rovným 6 (počet variant po sloučení snížený o jedna mínus počet odhadovaných parametrů). Výpočet kritické hodnoty se provede pomocí funkce CHIINV v programu Excel:

$$X_{\text{krit}} = \text{CHIINV}(0.05, 6) = 12,5916.$$

Srovnají-li se obě hodnoty, je patrné, že pozorovaná hodnota testové statistiky je menší než kritická hodnota testu, proto na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ nezamítáme nulovou hypotézu. Z toho je zřejmé, že se počet přijíždějících vozidel za minutu pro rameno vedoucí od centra může řídit Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,60$.

Rameno křižovatky od Nové Bělé („VJ“, „VB“, „KB“):

Tabulka 3.4: Četnosti pro proud od Nové Bělé

voz/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n_i	1	1	1	2	0	3	6	7	7	9	7	4	5	2	2	1	1	0	1

Odhad parametru λ :

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k v_i \cdot n_i$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + \dots + 18 \cdot 1)$$

$$\hat{\lambda} \cong 8,72 \text{ voz / min.}$$

Formulace nulové a alternativní hypotézy:

Nulová hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Nové Bělé řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,72$.

Alternativní hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Nové Bělé neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,72$.

Teoretické pravděpodobnosti $\pi_{0,i}$ a teoretické četnosti $n \cdot \pi_{0,i}$ pro proud od Nové Bělé udává tabulka 3.5, která je zpracována na následující straně diplomové práce.

Tabulka 3.5 Vypočtené hodnoty pro proud od Nové Bělé

Index varianty	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická pravděpodobnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	1	0,0002	0,0098
2	1	1	0,0014	0,0857
3	2	1	0,0062	0,3734
4	3	2	0,0181	1,0851
5	4	0	0,0394	2,3645
6	5	3	0,0687	4,1221
7	6	6	0,0998	5,9885
8	7	7	0,1243	7,4572
9	8	7	0,1354	8,1252
10	9	9	0,1312	7,8694
11	10	7	0,1143	6,8595
12	11	4	0,0906	5,4356
13	12	5	0,0658	3,9484
14	13	2	0,0441	2,6474
15	14	2	0,0275	1,6483
16	15	1	0,0160	0,9579
17	16	1	0,0087	0,5218
18	17	0	0,0045	0,2676
19	18 a více	1	0,0022	0,1296
Σ		60	1	60

Opět bylo jednotlivé varianty nutno sloučit, protože všechny teoretické četnosti nejsou větší než 5. Nově vzniklé sloučení lze vidět v tabulce 3.6.

Tabulka 3.6 Hodnoty po sloučení pro proud od Nové Bělé

Varianta	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
1	8	8,0407	0,0002
2	6	5,9885	0,0000
3	7	7,4572	0,0280
4	7	8,1252	0,1558
5	9	7,8694	0,1624
6	7	6,8595	0,0029
7	4	5,4356	0,3792
8	12	10,1210	0,3488
Σ	60	60	1,0774

Formulace závěru testu:

$$X_{\text{obs}} = 1,0774,$$

$$X_{\text{krit}} = \text{CHIINV}(0.05, 6) = 12,5916.$$

Pozorovaná hodnota testové statistiky je menší než kritická hodnota testu, proto na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ nezamítáme nulovou hypotézu. Počet přijíždějících vozidel se za minutu pro rameno vedoucí od Nové Bělé může řídit Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 8,72$.

Rameno křižovatky od Krmelína („VC“, „VG“):

Tabulka 3.7: Četnosti pro proud od Krmelína

voz/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
n_i	2	1	4	7	9	3	4	6	4	2	3	3	3	2	3	3	0	0	0	1

Odhad parametru λ :

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k v_i \cdot n_i$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 4 + 3 \cdot 7 + \dots + 19 \cdot 1)$$

$$\hat{\lambda} \cong 7,13 \text{ voz/min.}$$

Formulace nulové a alternativní hypotézy:

Nulová hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Krmelína řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 7,13$.

Alternativní hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Krmelína neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 7,13$.

Teoretické pravděpodobnosti $\pi_{0,i}$ a teoretické četnosti $n \cdot \pi_{0,i}$ pro proud od Krmelína udává tabulka 3.8.

Tabulka 3.8 Vypočtené hodnoty pro proud od Krmelína

Index varianty	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická pravděpodobnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	2	0,0008	0,0479
2	1	1	0,0057	0,3416
3	2	4	0,0203	1,2183
4	3	7	0,0483	2,8967
5	4	9	0,0861	5,1659
6	5	3	0,1228	7,3700
7	6	4	0,1460	8,7621
8	7	6	0,1488	8,9290
9	8	4	0,1327	7,9617
10	9	2	0,1052	6,3104
11	10	3	0,0750	4,5014
12	11	3	0,0487	2,9191
13	12	3	0,0289	1,7352
14	13	2	0,0159	0,9522
15	14	3	0,0081	0,4851
16	15	3	0,0038	0,2307
17	16	0	0,0017	0,1029
18	17	0	0,0007	0,0432
19	18	0	0,0003	0,0171
20	19 a více	1	0,0001	0,0099
Σ		60	1	60

Z tabulky lze vidět, že ne všechny teoretické četnosti jsou větší než 5, tudíž se musí jednotlivé varianty sloučit. Nově vzniklé sloučení je zpracováno v tabulce 3.9.

Tabulka 3.9 Hodnoty po sloučení pro proud od Krmelína

Varianta	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
1	23	9,6703	18,3738
2	3	7,3700	2,5911
3	4	8,7621	2,5881
4	6	8,9290	0,9608
5	4	7,9617	1,9713
6	2	6,3104	2,9442
7	18	10,9933	4,4659
Σ	60	60	33,8953

Formulace závěru testu:

$$X_{\text{obs}} = 33,8953,$$

$$X_{\text{krit}} = \text{CHIINV}(0.05, 5) = 11,0705.$$

Pozorovaná hodnota testové statistiky je větší než kritická hodnota testu, proto na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ zamítáme nulovou hypotézu. Nicméně při sestavování modelu bude pracováno s tím, že se vozidla přijíždějící za minutu pro rameno vedoucí od Krmelína řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 7,13$.

Rameno křižovatky od Staré Bělé („VD1“, „VD2“):

Tabulka 3.10: Četnosti pro proud od Staré Bělé

voz/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_i	4	11	9	9	11	12	1	1	1	0	1

Odhad parametru λ :

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k v_i \cdot n_i$$

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 4 + 1 \cdot 11 + 2 \cdot 9 + 3 \cdot 9 + \dots + 10 \cdot 1)$$

$$\hat{\lambda} \cong 3,18 \text{ voz/min.}$$

Formulace nulové a alternativní hypotézy:

Nulová hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Staré Bělé řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 3,18$.

Alternativní hypotéza: počet přijíždějících vozidel za minutu se pro rameno vedoucí od Staré Bělé neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 3,18$.

Teoretické pravděpodobnosti $\pi_{0,i}$ a teoretické četnosti $n \cdot \pi_{0,i}$ pro proud od Staré Bělé udává tabulka 3.11.

Tabulka 3.11 Vypočtené hodnoty pro rameno od Staré Bělé

Index varianty	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická pravděpodobnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	4	0,0414	2,4868
2	1	11	0,1319	7,9164
3	2	9	0,2100	12,6003
4	3	9	0,2228	13,3703
5	4	11	0,1773	10,6406
6	5	12	0,1129	6,7745
7	6	1	0,0599	3,5942
8	7	1	0,0272	1,6345
9	8	1	0,0108	0,6504
10	9	0	0,0038	0,2301
11	10 a více	1	0,0012	0,0732
Σ		60	1	60

Z tabulky lze vidět, že ne všechny teoretické četnosti jsou větší než 5, tudíž se musí jednotlivé varianty sloučit. Nově vzniklé sloučení je zpracováno v tabulce 3.12.

Tabulka 3.12 Hodnoty po sloučení pro rameno od Staré Bělé

Varianta	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
1	15	10,4033	2,0311
2	9	12,6003	1,0287
3	9	13,3703	1,4285
4	11	10,6406	0,0121
5	12	6,7745	4,0307
6	4	6,1825	0,7704
Σ	60	60	9,3016

Formulace závěru testu:

$$X_{\text{obs}} = 9,3016,$$

$$X_{\text{krit}} = \text{CHIINV}(0.05, 4) = 9,4877.$$

Pozorovaná hodnota testové statistiky je menší než kritická hodnota testu, proto na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ nezamítáme nulovou hypotézu. Počet přijíždějících vozidel se za minutu pro rameno vedoucí od Staré Bělé může řídit Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 3,18$.

Dílčí závěr:

Pomocí Pearsonova χ^2 testu dobré shody bylo ověřeno, že počet vozidel přijíždějících v ramenech od centra, Staré Bělé a Nové Bělé za minutu se řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Pro proud od Krmelína test dobré shody nevyšel, nicméně pro potřeby diplomové práce bude uvažováno, že počet vozidel se rovněž řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti.

Zároveň bude v rámci experimentální části práce vytvořen model, ve kterém se budou počty přijíždějících vozidel řídit daty získanými průzkumem.

Tabulka 3.13 Srovnání výsledných hodnot pro všechna ramena křižovatky

Srovnání oboru přijetí a kritického oboru				
Rameno	od centra	od Nové Bělé	od Krmelína	od staré Bělé
Řadící pruh	VA + VE	VJ + VB + KB	VC + VG	VD1 + VD2
x_{obs}	5,5208	1,0774	33,8953	9,3016
x_{krit}	12,5916	12,5916	11,0705	9,4877

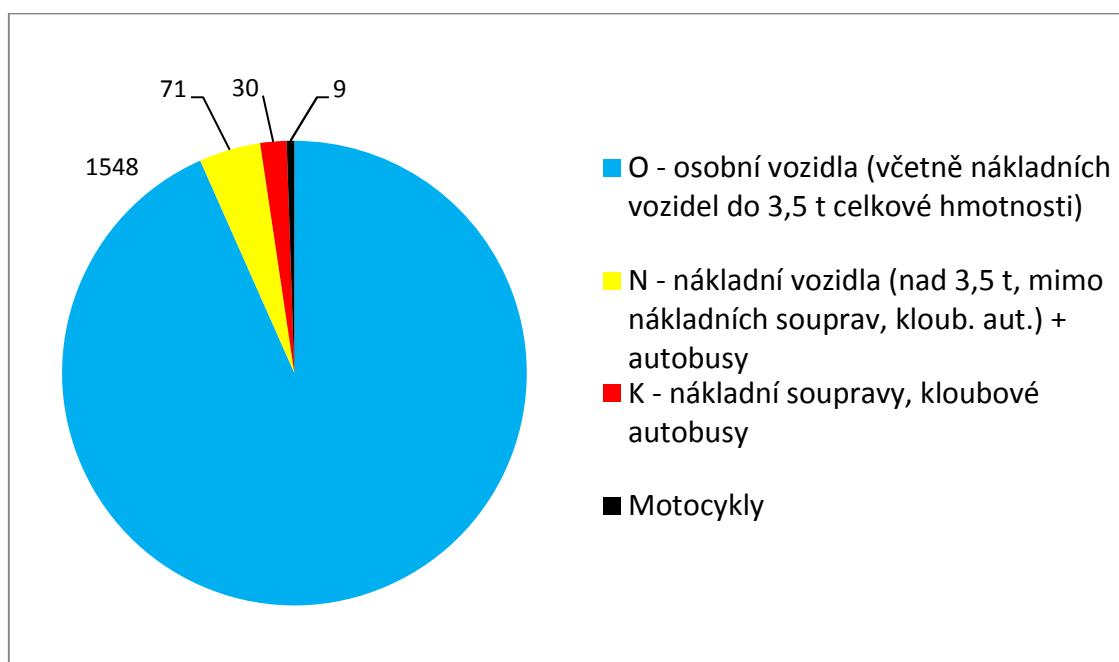
3.3.2 Zjištění skladby dopravních proudů

Zároveň se při tomto sčítání intenzit vozidel rozlišoval druh vozidla. Rozlišení bylo provedeno z důvodu odlišných vstupních časů a koeficientů, se kterými bude pracováno dále v simulačním modelu. Jednotlivé rozlišení vozidel je zobrazeno v tabulce č. 3.14.

Tabulka č. 3.14 Rozlišované druhy vozidel

Zkratka	Druh vozidel
M	Motocykly
O	Osobní vozidla (včetně nákladních vozidel do 3,5 t celkové hmotnosti)
N	Nákladní vozidla (nad 3,5 t celkové hmotnosti mimo nákl. souprav)
A	Autobusy (mimo kloubových)
K	Nákladní soupravy, kloubové autobusy

Výsledné složení dopravního proudu v době měření na řešené křižovatce č. 3045 lze vidět pomocí koláčového grafu, který je vykreslen na obr. č. 3.13. Rozlišení vozidel pro jednotlivé řadící pruhy je zpracováno v Příloze A.



Obr. č. 3.13 Počet příjezdějících vozidel v době průzkumu

Jelikož z provedeného průzkumu plyne, že zastoupení motocyklů je zanedbatelné, bude z důvodu zjednodušení modelu bráno, že tato kategorie bude sloučena s osobními vozidly. V simulačním modelu bude pracováno se třemi druhy vozidel, které uvádí tabulka 3.15. V tabulce jsou rovněž uvedeny přepočtové koeficienty podle TP235 [13]. Přepočtové koeficienty budou hrát hlavní roli při obsazení dopravníku v modelu, problém bude popsán v části práce věnujícímu se simulačnímu modelu.

Tabulka 3.15 Rozdělení vozidel pro potřeby simulace

Zkratka	Druh vozidel	Přepočtový koeficient
O	Osobní vozidla (včetně nákladních vozidel do 3,5 t celkové hmotnosti), motocykly	1
N	Nákladní vozidla (nad 3,5 t celkové hmotnosti mimo nákl. souprav) + autobusy	1,7
K	Nákladní soupravy, kloubové autobusy	2,5

V tabulce 3.16 je zpracováno procentuální rozdělení vozidel do jednotlivých proudů pro každé rameno křižovatky. S těmito hodnotami se bude pracovat v modelu, kde se budou vozidla na základě těchto podílů řadit do určitých řadících pruhů.

Tabulka 3.16 Podíly příjezdějících vozidel

Procentuální podíly příjezdějících vozidel k jednotlivým ramenům									
Rameno	od centra		od Nové Bělé			od Krmelína		od staré Bělé	
Řadící pruh	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
Podíl [%]	84	16	16	44	40	91	9	80	20

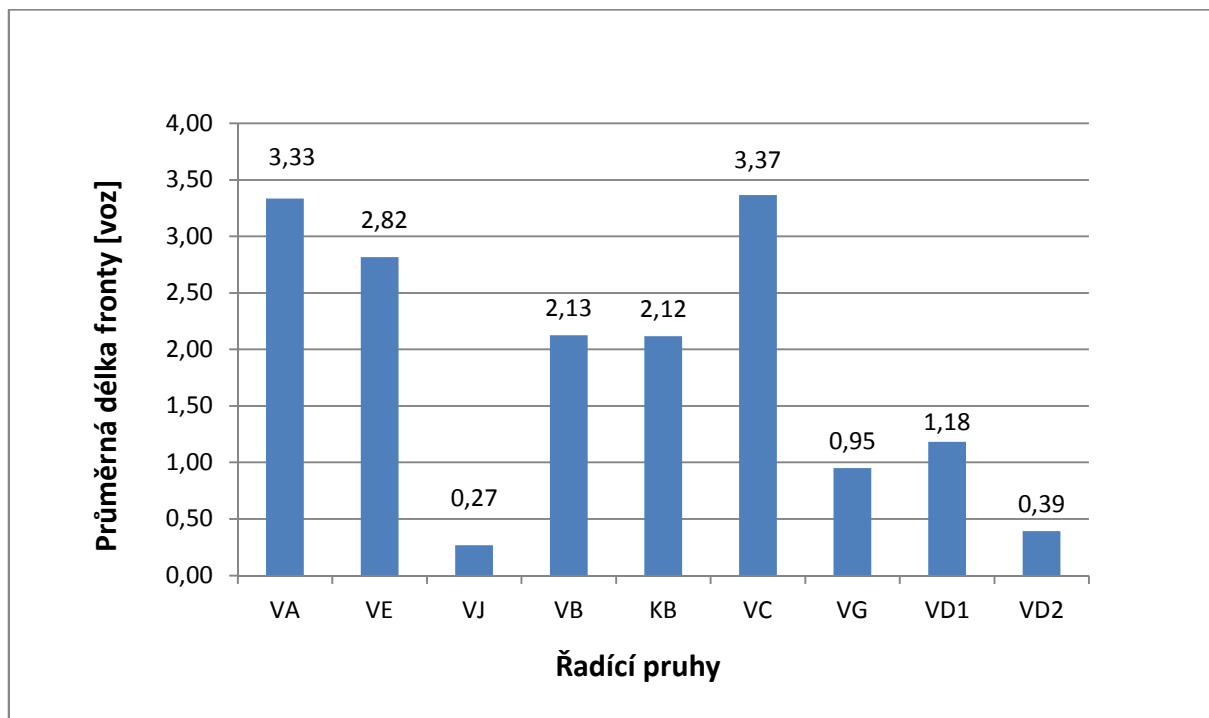
Následující tabulka udává podíly jednotlivých druhů vozidel. V rámci simulačního modelu budou hodnoty použity při rozlišení druhu příjezdících vozidel.

Tabulka 3.17 Podíly druhů vozidel v jednotlivých ramenech

Procentuální podíly jednotlivých druhů vozidel												
Rameno	od centra			od Nové Bělé			od Krmelína			od staré Bělé		
Řadící pruh	VA + VE			VJ + VB + KB			VC + VG			VD1 + VD2		
Druh	O	N+A	K	O	N+A	K	O	N+A	K	O	N+A	K
Podíl [%]	91	6	3	97	3	0	90	6	4	99	1	0

3.3.3 Stanovení počtu vozidel ve frontě

Další v pořadí se zjišťovala v každém řadícím pruhu fronta vozidel, která poslouží v diplomové práci k validaci simulačního modelu. Pod pojmem počet vozidel ve frontě se rozumí počet vozidel stojících v určitém řadícím pruhu za sebou v určitém okamžiku. Tyto fronty se zaznamenávaly co každou 30 sekundu po dobu 60 minut. Z těchto 120 hodnot (zpracováno v příloze A) pro každý řadící pruh se vypočítal aritmetický průměr, viz obr. č. 3.14. Následně se spočítaly pro každý proud dolní a horní meze konfidenčního intervalu, které poslouží při srovnání průměrných délek front při výsledné validaci.



Obr. č. 3.14 Průměrné délky front k validaci

Postup pro výpočet dolní a horní meze konfidenčních intervalů je rozebrán v teoretickém úvodu práce, níže bude realizován výpočet pro proud jedoucí od centra („VA“). Příklad výpočtu pro horní mez konfidenčního intervalu průměrné délky fronty pro proud „VA“:

K výpočtu směrodatné odchylky „s“ lze použít funkci v programu Excel:

$$= \text{SMODCH.VÝBĚR.S} = 2,64$$

$$\bar{x}_{\text{VA}} = 3,33$$

$$s_{\text{VA}} = 2,64$$

$$n = 120$$

$$z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1,96$$

$$T_{D\text{VA}} = \bar{x}_{\text{VA}} - \frac{s_{\text{VA}}}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 3,33 - \frac{2,64}{\sqrt{120}} \cdot 1,96 = \underline{2,86 \text{voz.}}$$

Příklad výpočtu pro horní mez konfidenčního intervalu průměrné délky fronty pro proud „VA“:

$$T_{H\text{VA}} = \bar{x}_{\text{VA}} + \frac{s_{\text{VA}}}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 3,33 + \frac{2,64}{\sqrt{120}} \cdot 1,96 = \underline{3,81 \text{voz.}}$$

Postup výpočtu pro ostatní dopravní proudy je analogický, tabulka 3.18 udává hodnoty výběrových směrodatných odchylek pro ostatní řadící pruhy, vypočítané hodnoty pro dolní a horní meze konfidenčního intervalu jsou zpracovány v tabulce 3.19.

Tabulka 3.18 Vypočítané hodnoty výběrových směrodatných odchylek

Výběrová směrodatná odchylka									
Ř. pruh	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
s [voz]	2,64	1,58	0,56	1,72	1,61	2,77	1,11	1,24	0,63

Tabulka 3.19 Dolní a horní meze konfidenčního intervalu průměrné délky front

Dolní mez konfidenčního délky front									
Ř. pruh	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
T _D [voz]	2,86	2,53	0,17	1,82	1,83	2,87	0,75	0,96	0,28
Horní mez konfidenčního intervalu délky front									
Ř. pruh	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
T _H [voz]	3,81	3,10	0,37	2,43	2,41	3,86	1,15	1,40	0,50

3.3.4 Zjištění způsobu řízení křižovatky

Při analýze křižovatky bylo třeba také zjistit, jakým způsobem se řešená křižovatka řídí. Řízení křižovatky zajišťuje signální plán, kterým se řídí světelné signalizační zařízení, jedná se o program řízení, který určuje sledy a délku individuálních signálních skupin.

Daná křižovatka se řídí pomocí tří signálních plánů. V době měření je aplikován signální plán P2, který je v provozu od 13:00 – 17:00 hod. a tento plán lze vidět v Příloze C. Firma Ostravské komunikace a. s. [9] poskytla signální plán pro zamýšlené využití diplomové práce. Jedná se o dynamický signální plán. Pod takto označeným plánem umožňuje světelné signalizační zařízení pružně zareagovat na vývoj situací vzniklých na křižovatce.

Pro samotnou simulaci modelu je třeba ze signálního plánu zaznamenat minimální a maximální doby zeleného signálu v sekundách viz tabulka 3.20. Číslo v závorkách značí indexy, pod kterými budou tyto hodnoty vystupovat v modelu. Rovněž byly zaznamenány ze signálního plánu jednotlivé nejdříve přípustné začátky a konce dob zelených, které jsou uloženy v modelu v inicializačních akcích. Hodnoty pro tyto proměnné jsou zapsány v tabulce 3.21.

Tabulka 3.20 Minimální a maximální doby volna pro jednotlivé signály

Minimální a maximální délky zelených								
Druh signálu	Proud	Signál	min	max	min	max	min	max
Plný zelený signál	VA	VA	17 (1)	49 (1)	12 (2)	51 (2)	5 (3)	16 (3)
Plný zelený signál	VC	VC	17 (4)	49 (4)	13 (5)	50 (5)	5 (6)	16 (6)
Plný zelený signál	VB,KB	VB	9 (7)	42 (7)	9 (8)	38 (8)		
Plný zelený signál	VD1,VD2	VD	8 (9)	18 (9)	8 (10)	15 (10)		
Plný zelený signál	VJ	VJ	5 (11)	14 (11)				
Signál pro opuštění křižovatky	KB	KB	1 (12)	20 (12)	1 (13)	17 (13)		
Doplňková zelená šipka	VJ	SJ	5 (14)	46 (14)	5 (15)	37 (15)		
Plný zelený signál (na výzvu)	VE	VE	0 (16)	14 (16)				
Plný zelený signál (na výzvu)	VG	VG	0 (17)	12 (17)				
Doplňková zelená šipka	VD1	SD	5 (18)	16 (18)				

Tabulka 3.21 Nejdříve přípustné začátky a konce doby volna

Začátky a konce nejdříve přípustných dob zelených		
Signál	Proměnná v modelu	Proměnná v modelu
VA	Zacatek_zelene (1) = 0	Konec_zelene (1) = 17
	Zacatek_zelene (2) = 42	Konec_zelene (2) = 53
	Zacatek_zelene (3) = 101	Konec_zelene (3) = 105
VC	Zacatek_zelene (4) = 0	Konec_zelene (4) = 17
	Zacatek_zelene (5) = 43	Konec_zelene (5) = 55
	Zacatek_zelene (6) = 101	Konec_zelene (6) = 105
VB	Zacatek_zelene (7) = 24	Konec_zelene (7) = 32
	Zacatek_zelene (8) = 62	Konec_zelene (8) = 70
VD	Zacatek_zelene (9) = 24	Konec_zelene (9) = 31
	Zacatek_zelene (10) = 62	Konec_zelene (10) = 70
VJ	Zacatek_zelene (11) = 78	Konec_zelene (11) = 82
KB	Zacatek_zelene (12) = 38	Konec_zelene (12) = 39
	Zacatek_zelene (13) = 77	Konec_zelene (13) = 78
SJ	Zacatek_zelene (14) = 25	Konec_zelene (14) = 34
	Zacatek_zelene (15) = 59	Konec_zelene (15) = 63
VE	Zacatek_zelene (16) = 84	Konec_zelene (16) = 84
VG	Zacatek_zelene (17) = 81	Konec_zelene (17) = 81
SD	Zacatek_zelene (18) = 82	Konec_zelene (18) = 86

Plné zelené signály „VE“ a „VG“ jsou pouze na výzvu. To znamená, že jsou-li řadící pruhy obsazeny vozidlem (vozidlo je detekováno na detektoru), signál volno proběhne. Nenachází-li se v daných pruzích vozidlo, signál volno neproběhne.

Jako parametr pro prodlužování zeleného signálu byla brána časová mezera mezi příjezdy vozidel přes detektory, pro proudy s vyššími intenzitami („VA“ a „VC“) 4 s, pro ostatní proudy 2 s. Nutno však poznamenat, že jsem neměl k dispozici přesně definována pravidla ani údaje k logice dynamického řízení řešené křižovatky, snahou bylo se přiblížit reálné situaci na křižovatce. Výsledné řešení tudíž nemusí přesně odpovídat logice prodlužování zeleného signálu.

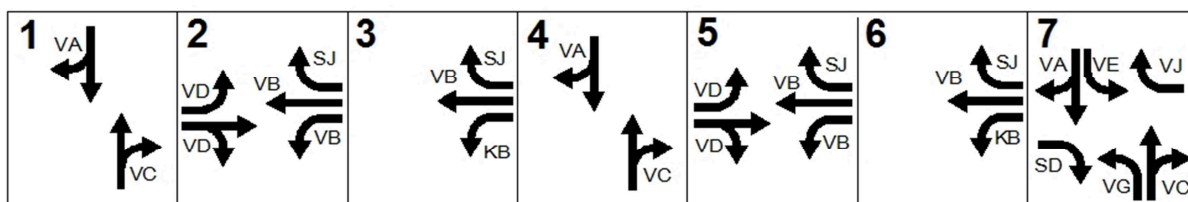
Dále bylo ze signálního plánu zjištěno, že minimální délka cyklu nabývá hodnoty 105 s, maximální délka cyklu nabývá hodnoty 212 s. S minimální délkou cyklu bude pracováno v modelu, bude reprezentovat výchozí délku cyklu na začátku simulace.

Fáze a fázové schéma

Z poskytnutého signálního plánu bylo vykresleno fázové schéma. Fázové schéma přiřazuje dopravní pohyby jednotlivým fázím. Výraz fáze reprezentuje časový interval,

v němž mají současně volno určité, zpravidla vzájemně nekolizní dopravní pohyby na křižovatce.

Fázové schéma poslouží pro tvorbu simulačního modelu. Fázové schéma je vykresleno na obr. č. 3.15.



Obr. č. 3.15 Fázové schéma řešené křižovatky

Z fázového schématu lze vypočítat, že v 2. a 5. fázi dochází k podmíněně kolizním pohybům na křižovatce, což samozřejmě musí být zaznamenáno v modelu.

V 7. fázi jsou signály „VE“ a „VG“ pouze na výzvu. Je-li vozidlům nacházejícím se na zmíněných proudech křižovatky umožněn vjezd do křižovatky prostřednictvím zeleného signálu, ostatní signály v této fázi neproběhnou. Jestliže signály na výzvu neproběhnou, signál „VE“ a „VG“ zařazen v 7. fázi není a do křižovatky smí vstoupit vozidla nacházející se v dané fázi.

3.3.5 Zjištění vzdáleností dopravních detektorů od stopčáry

V rámci dopravního průzkumu bylo třeba také zjistit délky jednotlivých řadících pruhů, vzdálenosti od stopčáry po detektor, od detektoru po začátek řadícího pruhu a počtu jednotkových vozidel, které se vejdou do daných úseků. Průzkum byl proveden na řešené křižovatce.

Tabulka 3.22 Data získaná průzkumem

pruh/veličina	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
s [m]	46	46	17	55	55	76	76	16	16
s ₁ [m]	27	40	0	40	55	55	70	5	12
s ₂ [m]	19	6	17	15	0	21	6	11	4
p _{jv} [j.v.]	8	7	3	10	9	13	12	3	3
vzdálenost [j.v.]	4	1	3	3	0	4	1	2	1

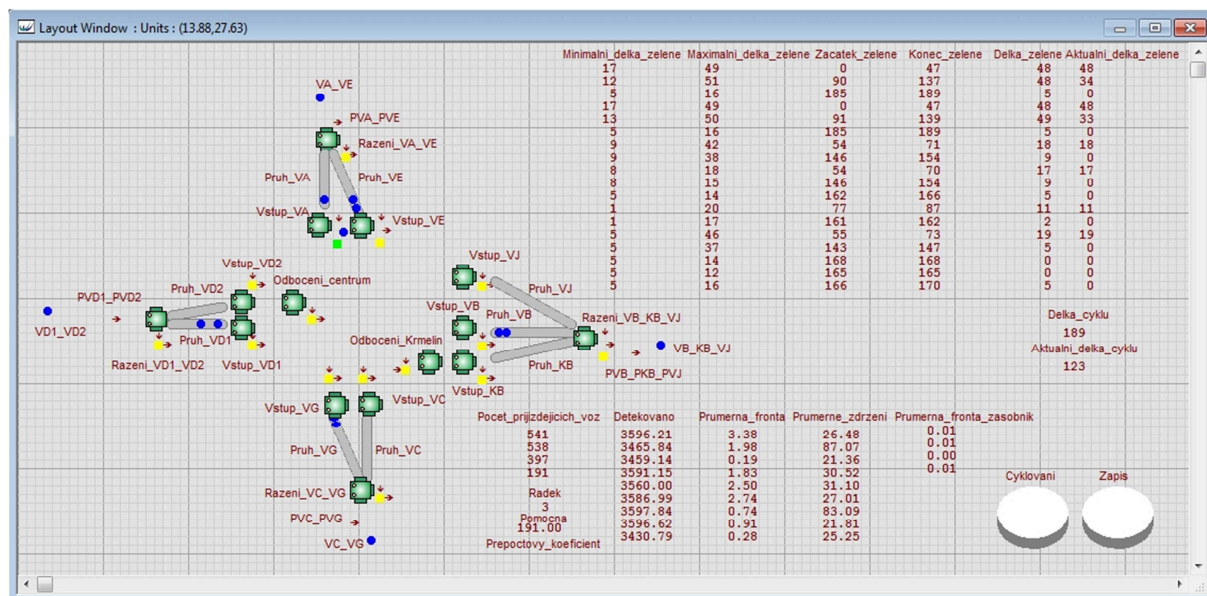
Vysvětlení veličin:

- s – celková délka řadícího pruhu,
- s_1 – vzdálenost od rozdělení určitého řadícího pruhu po detektor,
- s_2 – vzdálenost detektoru po vodorovnou dopravní značku stopčára,
- p_{jv} – počet jednotkových vozidel, které se mohou nacházet po celé délce řadícího pruhu, s touto hodnotou bude pracováno v modelu,
- $vzdálenost$ – počet jednotkových vozidel, která se nachází mezi stopčárou a detektorem, opět bude s touto hodnotou pracováno v modelu při umístění detektorů.

Dále bylo zjištěno, že detektor pro odbočující proud umožňující vozidlům z řadícího proudu „KB“ odbočit směr Krmelín se nachází v křižovatce za stopčárou. Z tohoto důvodu bude v modelu definován odlišným způsobem než detektory pro ostatní proudy, které jsou umístěny v řadících pruzích před vjezdem do křižovatky.

4 Tvorba simulačního modelu v prostředí Witness

Pro vytvoření modelu byl použit simulační software Witness 2008 Manufacturing Performance Edition. Tento simulační nástroj umožňuje sestavit model vycházející z reálných situací a posléze umožňuje s modelem realizovat experimenty za účelem získání informací o modelovaném systému. Na obr. č. 4.1 lze vidět výsledný model.



Obr. č. 4.1 Výsledný model

4.1 Definování veličin

Nejdříve byly do modelu vloženy prvky typu součást, zásobník, dopravník a stroj. Součást („*Part*“, např. „*VA_VE*“), zásobník („*Buffers*“, např. „*PVA_PVE*“) a stroj („*Machine*“, např. „*Razeni_VA_VE*“, „*Vstup_VA*“) patří mezi základní prvky, dopravník („*Conveyor*“, např. „*Pruh_VA*“) nalezneme mezi prvky, které slouží k modelování dopravních procesů.

Zároveň byly do modelu vloženy vstupní proměnné „Aktualni_delka_cyklu“, „Minimalni_delka_zelene“, „Maximalni_delka_zelene“, „Zacatek_zelene“, „Konec_zelene“, „Delka_zelene“, „Aktualni_delka_zelene“, „Delka_cyklu“, atribut „Prepoctovy_koefficient“, proměnná „Detekovano“ a pomocný koláčový graf pojmenovaný „Cyklovani“.

V další části modelu se budou modelovat výstupy z modelu, výsledné hodnoty se získají pomocí proměnných „*Pocet_prijizdejicich_vozidel*“ – bude sloužit k validaci, „*Prumerne_fronta*“ – opět poskytne data k validaci, „*Prumerne_zdrzeni*“,

„*Prumerna_fronta_zasobnik*“, „*Radek*“, „*Pomocna*“ a koláčový graf „*Zapis*“. V následující části práce budou jednotlivé prvky popsány.

Časovou jednotkou v simulačním modelu bude 1 s, tudíž všechny časové údaje budou udávány v sekundách. Celkový čas simulace je 3600 s.

4.2 Význam vstupních veličin

Cyklování

Pomocný koláčový graf pojmenovaný „*Cyklovani*“ slouží k tomu, aby se co sekundu navyšovala aktuální doba cyklu. V okně „*Refresh Interval*“ se zapíše hodnota 1.0, čímž se zabezpečí aktualizace koláčového grafu každou sekundu, což umožní navyšovat hodnotu aktuální doby cyklu. V akcích před obnovením koláčového grafu jsou zapsány další akce, které budou popsány níže.

Aktuální délka cyklu

Celočíselná proměnná „*Aktualni_delka_cyklu*“ udává, v jaké sekundě cyklu se simulační běh nachází. Daný zápis se musí provést v pomocném koláčovém grafu „*Cyklovani*“ pomocí formulace:

$$Aktualni_delka_cyklu = Aktualni_delka_cyklu + 1$$

$$IF\ Aktualni_delka_cyklu = Delka_cyklu$$

$$Aktualni_delka_cyklu = 0$$

Zápis vyjadřuje:

První řádek zajišťuje navyšování aktuální délky cyklu a hodnotu 1 s, ostatní zápisy slouží k vynulování aktuální délky cyklu po uplynutí délky cyklu.

Minimální a maximální délky zelených

Jedná se o celočíselné proměnné s kvantitou 18. Kvantita je dána počtem signálů, řešená křižovatka má celkem 18 signálů. Minimální a maximální délky zelených byly odečteny z poskytnutého signálního plánu, viz tab. 3.20, str. 47. Doba zeleného signálu se musí vždy pohybovat mezi tímto minimem a maximem pro každý signál. V modelu jsou zapsány v inicializačních akcích a také v pomocném koláčovém grafu „*Cyklovani*“.

Začátky zelené a konce zelené

Proměnná „*Zacatek_zelene*“ a „*Konec_zelene*“ je celočíselného charakteru s kvantitou 18. Na začátku simulace jsou v inicializačních akcích zapsány hodnoty minimálních délek signálů volno odečtené ze signálního plánu, viz tab. 3.21, str. 48. V průběhu simulace se pak tyto hodnoty z důvodu dynamického řízení mění.

Délka zelené

Uvedená celočíselná proměnná vyjadřuje, jakou délku zelené má určitý signál. Tato hodnota je v průběhu simulace proměnná. Zápis pro výpočet se provede v inicializačních akcích modelu, uveďme příklad zápisu pro signál s pořadovým číslem 1:

$$Delka_zelene(1) = Konec_zelene(1) - Zacatek_zelene(1) + 1.$$

Tento zápis platí pro první signál v první fázi cyklu pro proud „VA“. Pro ostatní signály se provede analogicky. Zápis se musí zapsat také v grafu „*Cyklovani*“. Nutno poznamenat, že daná proměnná má opět kvantitu 18. Na začátku simulace a při každém konci cyklu je hodnota nastavena na minimální hodnotu.

Aktuální délka zelené

Celočíselná proměnná „*Aktualni_delka_zelene*“ udává hodnotu, kolik sekund zelené už uběhlo pro daný signál. Zápis pro výpočet všech signálů se provede v pomocném koláčovém grafu „*Cyklovani*“. Pro názorný příklad bude níže vypsána akce pro proud „VA“ jedoucí od centra:

IF Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene(1)

AND Aktualni_delka_cyklu >= Zacatek_zelene(1)

Aktualni_delka_zelene(1) = Aktualni_delka_cyklu - Zacatek_zelene(1) + 1

ENDIF

Délka cyklu

Hodnota pro celočíselnou proměnnou „*Delka_cyklu*“ je na začátku simulace rovna délce 105 s. Zmíněná hodnota se odečte ze signálního plánu, je to minimální délka cyklu, která za každých okolností proběhne. Zápis se provede v inicializačních akcích. V rámci dynamického řízení je možno hodnotu prodloužit až do maximální přípustné výše 212 s – opět odečteno ze signálního plánu.

Přepočtový koeficient

Celočíselný atribut s kvantitou 1 „*Prepoctovy_koeficient*“ slouží k rozlišení druhu příjíždějících vozidel. S tímto atributem je pracováno v součástech a ve strojích, níže v těchto prvcích bude vysvětleno, jak daný atribut funguje.

Detekováno

Jelikož máme 9 řadících pruhů, tato proměnná bude nabývat kvantit 9. S proměnnou se pracuje v prvcích modelu, které simulují řadící pruhy. Udává hodnotu simulačního času, kdy bylo naposled detekováno vozidlo v daném proudu.

Součást

Jelikož se jedná o čtyřramennou křižovatku, tak jsou do modelu vloženy čtyři součásti reprezentující vozidla, která příjíždějí k danému ramenu křižovatky. Pojmenování jednotlivých prvků je odvozeno podle řadících pruhů, ke kterým vozidla příjíždějí (vozidla jedoucí z centra, která příjíždějí ke křižovatce, jsou pojmenována symbolem „*VA_VE*“). V detailech těchto prvků je třeba specifikovat vlastnosti, které budou odpovídat chování takto příjíždějících vozidel. Jelikož se jedná o součást, která vstupuje do modelu o vlastní vůli, musí se nastavit v detailech těchto součástí, že se jedná o prvek aktivní. Mezery mezi příjezdy vozidel se řídí exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti, což bylo dokázáno v předchozí kapitole, tudíž se do okna „*Inter Arrival Time*“ zapíše výraz pro generování hodnot exponenciálního rozdělení „*NEGEXP (60 / λ)*“, kde λ reprezentuje známou vypočtenou hodnotu ze zjištěných intenzit vozidel. Zmíněná hodnota se také vepíše do okna „*First Arrival At*“ – reprezentuje první příjezd. Do editací vstupních pravidel zapíšeme, do kterého zásobníku bude součást posílána – například pro rameno od centra zapíšeme „*PUSH to PVA_PVE*“. Dále se musí ještě v detailech těchto součástí zajistit, o jaký druh vozidla se bude jednat. Daný zápis se formuluje v okně „*Actions on Create*“, což značí editování akcí při vstupu, které slouží k realizaci pomocných výpočtů. Detail daného okna pro rameno „*VA_VE*“ je vyobrazen na obr. č. 4.2.

Formulace zápisu v editačních akcích při vstupu u součásti „*VA_VE*“:

Prepoctovy_koeficient = 1

IF UNIFORM (0,1) <= 0.97 AND UNIFORM (0,1) > 0.91

Prepoctovy_koeficient = 1.7

ENDIF

IF UNIFORM (0,1) > 0.97

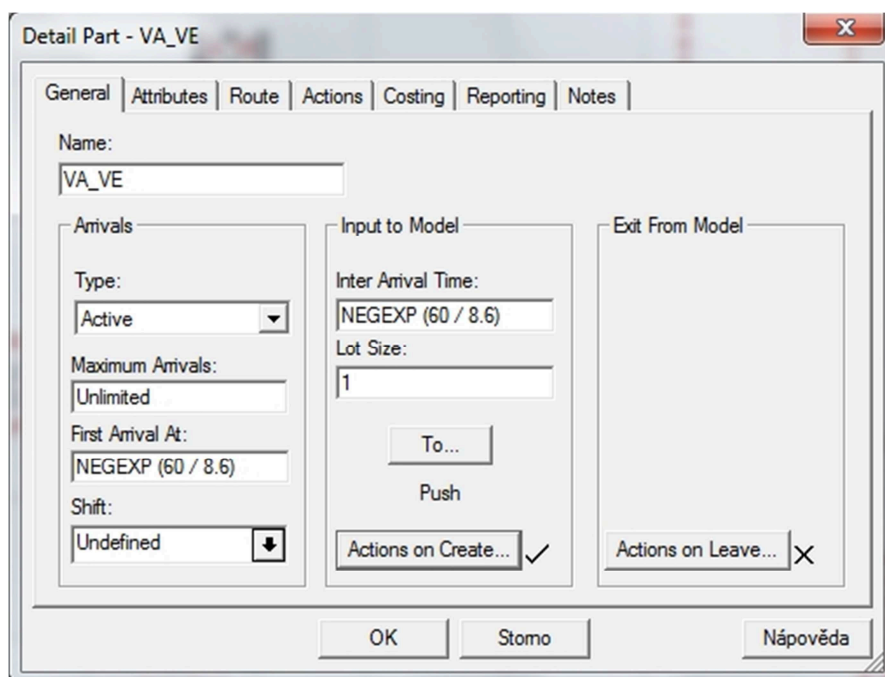
Prepoctovy_koeficient = 2.5

ENDIF

Tento zápis vyjadřuje:

Jestliže je vygenerovaná hodnota z rovnoměrného rozdělení z intervalu (0,1) menší nebo rovna 0,97 a zároveň větší než 0,91, jedná se o nákladní vozidlo a je mu tedy přiřazen přepočtový koeficient 1,7, jestliže je vygenerovaná hodnota z rovnoměrného rozdělení z intervalu (0,1) větší než 0,97, tak se jedná o nákladní soupravu a je tomuto vozidlu přiřazen přepočtový koeficient 2,5, v jiném případě než výše uvedeném se jedná o osobní vozidlo a je mu přiřazen přepočtový koeficient rovný 1.

Tabulka s procentuálními podíly jednotlivých druhů vozidel pro všechna ramena křižovatky je zpracována v tab. č. 3.17, str. 45.

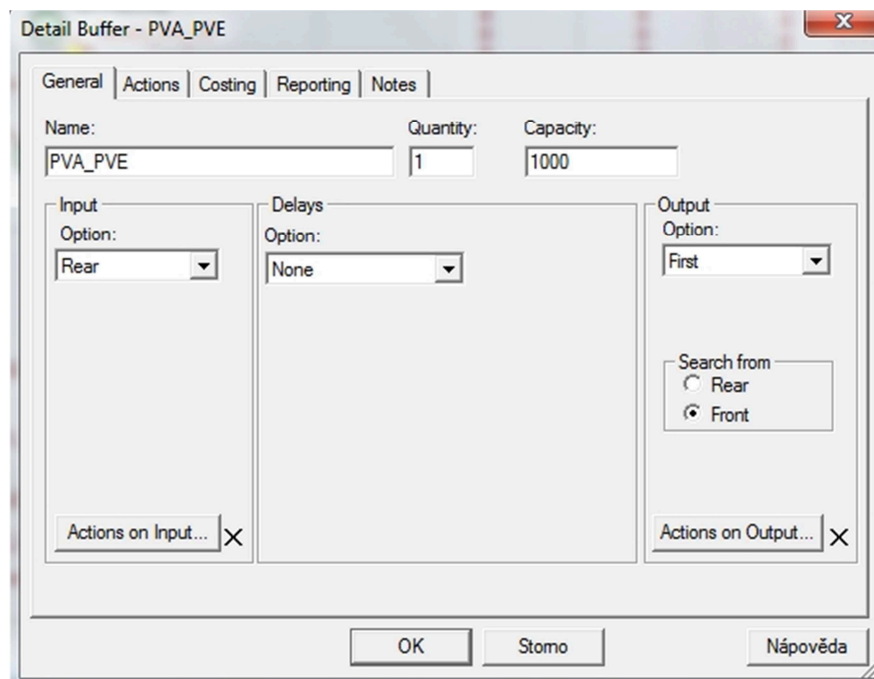


Obr. č. 4.2 Detail prvku součást

Zásobník

Zásobníky jsou místa, kde se skladují součásti. Jsou to prvky pasivní, což znamená, že jsou do těchto prvků součásti posílány a zároveň tyto součásti musí určitý prvek ze zásobníku vyjmout. V této práci se bude jednat o zásobník typu FIFO. Tento typ je specifický tím, že první součást, která do tohoto zásobníku vstoupí, jako první ze zásobníku vystoupí. Zásobníky reprezentují pozemní komunikaci před řadičím pruhem

křižovatky, na kterou přijíždějí vozidla. Aby nedocházelo k nežádoucímu odmítání vozidel, přednastavila se dostatečná kapacita zásobníků. V daném typu zásobníku nebylo třeba kromě pojmenování nic nastavovat. Na obr. č. 4.3 lze vidět detail dopravníku pro vozidla přijíždějící od centra.



Obr. č. 4.3 Detail zásobníku

Stroj

Prvotní stroj označený např. „*Razeni_VA_VE*“ slouží k tomu, aby odebíral vozidla z určeného zásobníku. Tento děj se uskutečňuje pomocí vstupního pravidla, kde se formuluje zápis „*PULL from PVA_PVE*“. Zároveň umožňuje rozdělovat přijíždějící vozidla do řadících pruhů. Hodnota operačního času je rovna nule, jelikož stroj slouží pouze k rozdělení vozidel do patřičných řadících pruhů. Detail stroje je zobrazen na obr. č. 4.4. Rozdělení vozidel se zajistí v editacích výstupních pravidel pomocí zápisu:

IF UNIFORM (0,1) <= 0.84

PUSH VA_VE to Pruh_VA at Rear

ELSE

PUSH VA_VE to Pruh_VE at Rear

ENDIF

Zápis znamená:

Jestliže je vygenerovaná hodnota z rovnoměrného rozdělení z intervalu (0,1) menší nebo rovna 0,84, bude vozidlo zařazeno do řadícího pruhu označeného „*Pruh_VA*“, v opačném případě bude zařazeno do levého odbočujícího pruhu pro vozidla, která odbočují do Nové Bělé („*Pruh_VE*“).

Tabulka s procentuálními podíly rozdělení vozidel do jednotlivých řadících pruhů je zpracována v tab. č. 3.16, str. 44.

Obr. č. 4.4 Detail stroje umožňující řazení přijíždějících vozidel

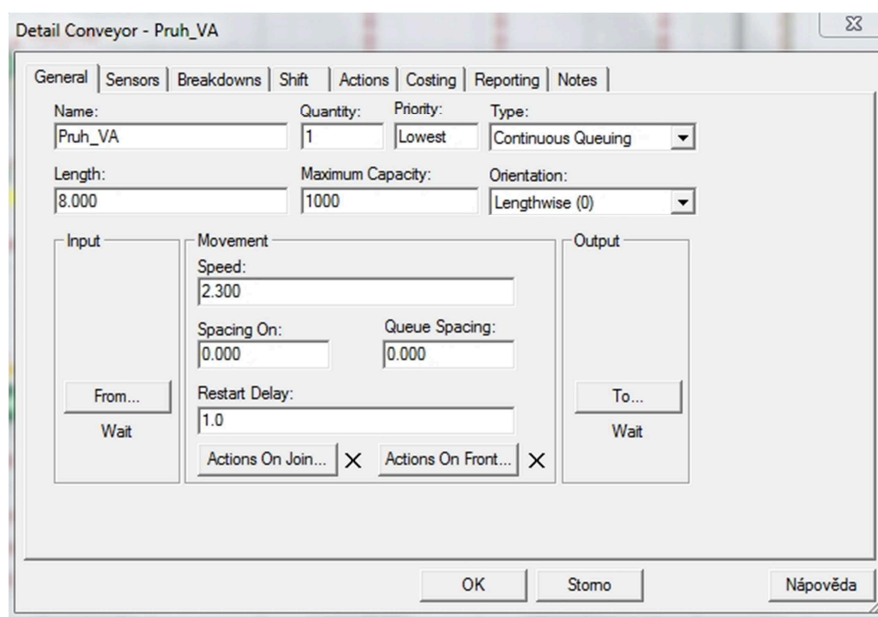
Dopravník

Za umístěným strojem se nachází dopravník (obr. č. 4.5) modelující úsek mezi místem, kde dochází k rozdělení jízdních pruhů, a místem, označeným vodorovnou dopravní značkou příčná čára souvislá. V detailech těchto dopravníků mimo pojmenování (např. „*Pruh_VA*“ pro proud od centra) je třeba nastavit, že se jedná o typ „*Continuous Queuing*“. Ve vstupním pravidle zůstává v platnost formulace „*Wait*“, což značí, že daný dopravník vyčkává na příjezd vozidla. Okno „*Lenght*“ udává délku příčného řadícího pruhu v jednotkových vozidlech. Zmíněná délka se pro jednotlivé řadící pruhy zjišťovala pomocí dopravního průzkumu, viz tab. č. 3.22 str. 49. Pro řešený dopravník pro proud jedoucí od centra se zapíše délka rovna 8. Hodnota v okně „*Speed*“ udává, o kolik délkových jednotek se součást na dopravníku posune za 1 s.

Výpočet hodnoty „Speed“:

- Jednotka délky = 1 jednotkové vozidlo,
- 1 jednotkové vozidlo = 6 m,
- Rychlost = 50 km/h = 13,89 m/s,

$$"Speed" = \frac{13,89}{6} \doteq 2,3.$$



Obr. č. 4.5 Detail okna dopravníku

Pro všechny řešené proudy jsou hodnoty v dopravníku rovny 2,3. Okno pojmenované „Restart Delay“ zajišťuje dobu, která je zapotřebí k rozjetí vozidla. Pro potřeby této diplomové práce byla brána hodnota z TP81 [2] 1,0 s.

Záložka „Sensors“ umožňuje definovat senzory na spojitých dopravnících. Senzory mohou být umístěny v libovolném místě dopravníku a spouštět události, jako je např. detekování projíždějícího vozidla. Rovněž umožňují definovat místa, kde ostatní prvky mohou odebírat nebo posílat součásti. Poloha senzorů se udává podle vzdálenosti od čela dopravníku. Použitá vzdálenost musí odpovídat jednotce použité v délce dopravníku. Detektor zabudovaný v jízdním pruhu „VA“ je ve vzdálenosti 4 vozidel od vstupu do křižovatky, tudíž se do okna „Position“ запиše hodnota 4. Do okna „Part On“ je zapotřebí nadefinovat, kdy bude součást – tedy v tomto případě vozidlo detekována. Formulace dané akce:

Detekovano (1) = TIME

Rovněž se do příslušného okna nadefinuje zápis pro prodlužování délky zeleného signálu, opět bude uveden případ pro proud „VA“:

IF TIME - Detekovano (1) <= 4 AND Aktualni_delka_zelene (1) >= Minimalni_delka_zelene (1) - 3 AND Aktualni_delka_zelene (1) <= Konec_zelene (1) - 3 AND Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene (1) AND Delka_zelene (1) <= Maximalni_delka_zelene (1) - 3 AND Delka_zelene (4) <= Maximalni_delka_zelene (4) - 3 AND Konec_zelene (1) - TIME <= 3

Konec_zelene (1) = Konec_zelene (1) + 3

Delka_cyklu = Delka_cyklu + 3

Delka_zelene (1) = Konec_zelene (1) - Zacatek_zelene (1) + 1

Zacatek_zelene (2) = Zacatek_zelene (2) + 3

Zacatek_zelene (3) = Zacatek_zelene (3) + 3

Zacatek_zelene (5) = Zacatek_zelene (5) + 3

Zacatek_zelene (6) = Zacatek_zelene (6) + 3

Zacatek_zelene (7) = Zacatek_zelene (7) + 3

Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (8) + 3

Zacatek_zelene (9) = Zacatek_zelene (9) + 3

Zacatek_zelene (10) = Zacatek_zelene (10) + 3

Zacatek_zelene (11) = Zacatek_zelene (11) + 3

Zacatek_zelene (12) = Zacatek_zelene (12) + 3

Zacatek_zelene (13) = Zacatek_zelene (13) + 3

Zacatek_zelene (14) = Zacatek_zelene (14) + 3

Zacatek_zelene (15) = Zacatek_zelene (15) + 3

Zacatek_zelene (16) = Zacatek_zelene (16) + 3

Zacatek_zelene (17) = Zacatek_zelene (17) + 3

Zacatek_zelene (18) = Zacatek_zelene (18) + 3

Konec_zelene (2) = Konec_zelene (2) + 3

Konec_zelene (3) = Konec_zelene (3) + 3

Konec_zelene (4) = Konec_zelene (4) + 3

Delka_zelene (4) = Konec_zelene (4) - Zacatek_zelene (4) + 1

Konec_zelene (5) = Konec_zelene (5) + 3

Konec_zelene (6) = Konec_zelene (6) + 3

Konec_zelene (7) = Konec_zelene (7) + 3

Konec_zelene (8) = Konec_zelene (8) + 3

Konec_zelene (9) = Konec_zelene (9) + 3
Konec_zelene (10) = Konec_zelene (10) + 3
Konec_zelene (11) = Konec_zelene (11) + 3
Konec_zelene (12) = Konec_zelene (12) + 3
Konec_zelene (13) = Konec_zelene (13) + 3
Konec_zelene (14) = Konec_zelene (14) + 3
Konec_zelene (15) = Konec_zelene (15) + 3
Konec_zelene (16) = Konec_zelene (16) + 3
Konec_zelene (17) = Konec_zelene (17) + 3
Konec_zelene (18) = Konec_zelene (18) + 3
ENDIF
IF TIME - Detekovano (1) <= 4 AND Aktualni_delka_zelene (2) >=
Minimalni_delka_zelene (2) - 3 AND Delka_zelene (2) <= Maximalni_delka_zelene (2) - 3
AND Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene (2) AND Aktualni_delka_zelene (2) <=
Konec_zelene (2) - 3 AND Delka_zelene (5) <= Maximalni_delka_zelene (5) - 3 AND
Konec_zelene (2) - TIME <= 3
Konec_zelene (2) = Konec_zelene (2) + 3
Delka_cyklu = Delka_cyklu + 3
Delka_zelene (2) = Konec_zelene (2) - Zacatek_zelene (2) + 1
Zacatek_zelene (3) = Zacatek_zelene (3) + 3
Zacatek_zelene (6) = Zacatek_zelene (6) + 3
Zacatek_zelene (8) = Zacatek_zelene (8) + 3
Zacatek_zelene (10) = Zacatek_zelene (10) + 3
Zacatek_zelene (11) = Zacatek_zelene (11) + 3
Zacatek_zelene (13) = Zacatek_zelene (13) + 3
Zacatek_zelene (15) = Zacatek_zelene (15) + 3
Zacatek_zelene (16) = Zacatek_zelene (16) + 3
Zacatek_zelene (17) = Zacatek_zelene (17) + 3
Zacatek_zelene (18) = Zacatek_zelene (18) + 3
Konec_zelene (3) = Konec_zelene (3) + 3
Konec_zelene (5) = Konec_zelene (5) + 3
Delka_zelene (5) = Konec_zelene (5) - Zacatek_zelene (5) + 1
Konec_zelene (6) = Konec_zelene (6) + 3
Konec_zelene (8) = Konec_zelene (8) + 3

$Konec_zelene(10) = Konec_zelene(10) + 3$
 $Konec_zelene(11) = Konec_zelene(11) + 3$
 $Konec_zelene(13) = Konec_zelene(13) + 3$
 $Konec_zelene(15) = Konec_zelene(15) + 3$
 $Konec_zelene(16) = Konec_zelene(16) + 3$
 $Konec_zelene(17) = Konec_zelene(17) + 3$
 $Konec_zelene(18) = Konec_zelene(18) + 3$
 ENDIF

Zápis vyjadřuje:

První podmínka „ $IF\ TIME - Detekovano(1) \leq 4$ “ zajišťuje, že mezera mezi detekovanými vozidly je nejvýše rovna dané maximální časové mezeře (v daném případě 4, jedná se o silný dopravní proud, stejná hodnota platí pro proud „VC“, pro ostatní řadící pruhy se bude jednat o maximální časovou mezeru rovnou 2).

Druhá a třetí podmínka „ $Aktualni_delka_zelene(1) \geq Minimalni_delka_zelene(1) - 3$ AND $Aktualni_delka_zelene(1) \leq Konec_zelene(1) - 3$ “ říká, že aktuální délka zelené se nachází v intervalu, který je dán minimální délkou zelené sniženou o předepsanou hodnotu a maximální délkou zelené sniženou o předepsanou hodnotu (předepsaná hodnota – velikost této hodnoty zajišťuje, aby docházelo k prodlužování zelené pouze tehdy, nacházíme-li se v oblasti zeleného signálu pro jeho prodlužování a současně tímto zajišťujeme, aby nebyla zelená prodloužena na nepřipustnou hodnotu).

Čtvrtá podmínka „ $Aktualni_delka_cyklu \leq Konec_zelene(1)$ “ zajišťuje, aby se zelená neprodlužovala tehdy, pokud již došlo k jejímu konci.

Pátá a šestá podmínka „ $Delka_zelene(1) \leq Maximalni_delka_zelene(1) - 3$ AND $Delka_zelene(4) \leq Maximalni_delka_zelene(4) - 3$ “ zajišťují, aby při prodlužování délky fáze nedošlo k překročení maximální délky zelené pro žádný proud nacházející se v dané fázi.

Sedmá podmínka „ $Konec_zelene(1) - TIME \leq 3$ “ zajišťuje, že zelená pro daný proud již nebyla natolik prodloužena, aby poslední detekované vozidlo mohlo projet stopčárou bez nutnosti dalšího prodlužování.

Další akce zajišťují samotné prodlužování.

Stroje reprezentující vjezd vozidel do křižovatky jsou rovněž pojmenovány podle názvu řadících pruhů, např. pro proud od centra „Vstup_VA“. Vjezd vozidel do křižovatky je samozřejmě povolen pouze při zeleném signálu, dovolující vjezd daného vozidla do křižovatky. Toto se zajistí v každém stroji pomocí vstupních pravidel. Pro názorný příklad bude vypsána formulace u stroje „Vstup_VA“:

IF Aktualni_delka_cyklu >= Zacatek_zelene (1) AND Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene (1)

PULL from VA_VE out of Pruh_VA at Front

ELSEIF Aktualni_delka_cyklu >= Zacatek_zelene (2) AND Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene (2)

PULL from VA_VE out of Pruh_VA at Front

ELSEIF Aktualni_delka_cyklu >= Zacatek_zelene (3) AND Aktualni_delka_cyklu <= Konec_zelene (3) AND Delka_zelene (17) = 0

PULL from VA_VE out of Pruh_VA at Front

ELSE

Wait

ENDIF

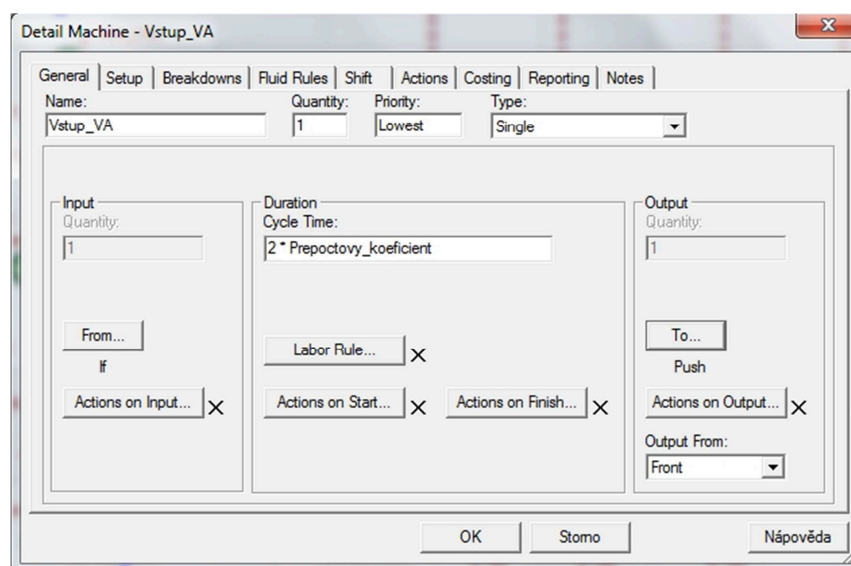
Zápis vyjadřuje:

- jestliže je aktuální délka cyklu větší než začátek zelené pro signál (1) a zároveň je aktuální délka cyklu menší než konec zelené pro signál (1), smí vozidla čekající v řadícím pruhu před stopčárou vjet do křižovatky,
- jestliže je aktuální délka cyklu větší než začátek zelené pro signál (2) a zároveň je aktuální délka cyklu menší než konec zelené pro signál (2), smí vozidla čekající v řadícím pruhu před stopčárou vjet do křižovatky,
- jestliže je aktuální délka cyklu větší než začátek zelené pro signál (3) a zároveň je aktuální délka cyklu menší než konec zelené pro signál (3) a délka zeleného signálu pro proud „VG“ neproběhla, smí vozidla čekající v řadícím pruhu před stopčárou vjet do křižovatky.

Řadící pruh „VA“ má v jednom cyklu volno vícekrát, tudíž je to výše uvedenými pravidly zohledněno. Specifická situace může nastat u proudu „VA“ a „VC“, kdy proudu „VA“ je umožněn vstup vozidel do křižovatky také v poslední fázi cyklu, jestliže se

v proudu „VG“ (tento proud se řídí signálem (17)) nenachází žádná vozidla. Analogicky to platí pro proud „VC“, jestliže se v proudu „VE“ nenachází žádné vozidlo.

Do těchto strojů v okně „Cycle Time“ (viz obr č. 4.6), který označuje dobu zpracování součásti ve stroji, se zapíše zápis: „2*Prepocetovy_koeficient“. Vstupní čas pro jednotkové vozidlo je brána hodnota 2 s. Po ukončení zpracování ve stroji bude součást poslána pryč z modelu, formulace se provede v editaci výstupních pravidel pomocí zápisu „PUSH to SHIP“.



Obr. č. 4.6 Detail stroje

V druhé a páté fázi cyklu dochází k podmíněně kolizním dopravním pohybům na křižovatce. V simulačním modelu bude zmíněná situace zachycena tím, že budou do modelu vloženy dva pomocné stroje pojmenované „Odboceni_centrum“ sloužící pro proud „VD2“ a „Odboceni_Krmelin“ pro proud „KB“. V detailech těchto strojů se musí nadefinovat pravidla, která budou simulovat, že vozidla, která přijíždějí do křižovatky, musí dávat ze zákona o pravidlech silničního provozu přednost protijedoucím vozidlům. Pro názorný příklad je uvedena akce zapsaná ve výstupním pravidle stroje pojmenovaného „Odboceni_Krmelin“:

IF NPARTS (Vstup_VD1) = 0

PUSH to SHIP

ELSE

Wait

ENDIF

Zápis vyjadřuje:

Jestliže se v řadícím pruhu „VDI“ nevyskytuje žádné vozidlo, mohou vozidla ze směru Nová Bělá, která zamýšlejí odbočit vlevo směr Krmelín, vjet do křižovatky, jinak musí čekat.

Analogicky se nadefinuje příslušná akce u pomocného stroje „Odboceni_centrum“.

4.3 Význam výstupních veličin

Průměrné zdržení

Reálná proměnná „*Prumerne_zdrzeni*“ s kvantitou 9 pro každý řadící pruh zaznamenává průměrné zdržení vozidel v sekundách, v daném jízdním pruhu za sledované období 1 hodiny.

Průměrná fronta zásobník

Reálná proměnná „*Prumerna_fronta_zasobnik*“ vyjadřuje množství vozidel čekajících před řadícími pruhy každého z ramen křižovatky. Z toho vyplývá, že proměnná nabývá 4 hodnot. V modelu byla tato proměnná zahrnuta z důvodu zjištění, jestli nebudou tato vozidla ovlivňovat výslednou proměnnou „*Prumerna_fronta*“ určenou k validaci.

Pomocná a řádek

V simulačním modelu je celočíselná proměnná „*Radek*“ a reálná proměnná „*Pomocna*“ definovány z důvodu zápisu výsledných hodnot do Excelu.

Zápis

Pomocný koláčový graf „*Zapis*“ slouží k zápisu výsledných hodnot do Excelu. V detailu tohoto grafu se musí formulovat zápisy k vyřešení výstupních proměnných. Pro názorný příklad bude vypsán zápis pro řadící pruh „VA“ (rameno křižovatky od centra):

Prumerne_zdrzeni (1) = *ATIME* (*Pruh_VA*)

Prumerna_fronta (1) = *APARTS* (*Pruh_VA*)

Prumerna_fronta_zasobnik (1) = *APARTS* (*PVA_PVE*)

Pocet_prijizdejicich_voz (1) = *NCREATE* (*VA_VE*)

Pomocna = *Prumerna_fronta* (1)

XLWriteArray ("Vysledky_1.XLSX", "LIST1", "C" + *Radek*, *Pomocna*, 1)

Počet příjezdějících vozidel a průměrná fronta

Zmíněné proměnné jsou nejdůležitějším výstupem ze simulačního modelu. Proměnné slouží k validaci simulačního modelu. Porovnání těchto proměnných se zjištěnými intenzitami a frontami bude probráno v další kapitole práce – Validace simulačního modelu.

Výsledný model je zpracován v příloze D.

5 Validace simulačního modelu

Pod pojmem validace se rozumí prověření prostřednictvím objektivního důkazu, že vytvořený simulační model vykazuje dostatečnou míru shody s realitou, s potřebou na plánované využití simulačního modelu.

Validace v této diplomové práci se skládá ze dvou částí. V první části se srovnávaly průměrné délky front, v druhé části se srovnával celkový počet přijíždějících vozidel k jednotlivým ramenům.

Průměrná délka fronty reprezentuje počet vozidel, která stojí za sebou v jednom řadícím pruhu. S modelem bylo provedeno 50 simulačních běhů (zpracováno v Příloze D) a z těchto běhů byl vypočten aritmetický průměr délek front pro všechny řadící pruhy. Následně bylo provedeno srovnání průměrných délek zjištěných průzkumem s průměrnými délkami zjištěnými simulací. Srovnání lze vidět v následující tabulce.

Tabulka 5.1 Validace simulačního modelu

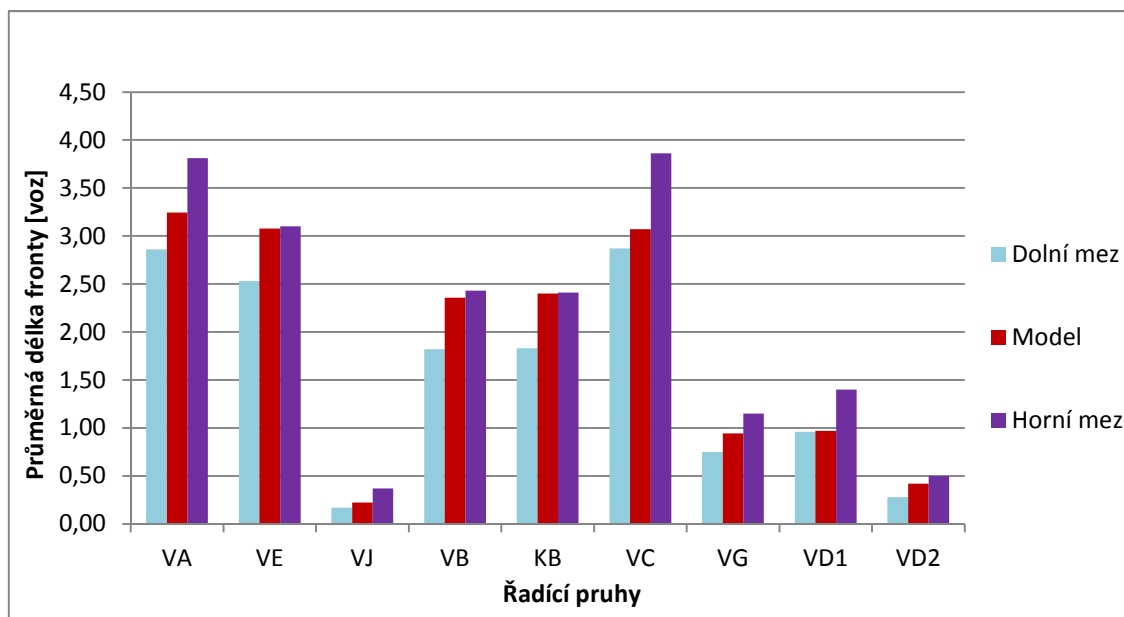
Srovnání průměrných délek front									
Rameno křižovatky	od centra		od Nové Bělé			od Krmelína		od Staré Bělé	
Řadící pruh	VA	VE	VJ	VB	KB	VC	VG	VD1	VD2
Dopravní průzkum [voz]	3,33	2,82	0,27	2,13	2,12	3,37	0,95	1,18	0,39
Simulační model [voz]	3,25	3,08	0,22	2,36	2,40	3,07	0,94	0,97	0,42
Odchylka [%]	2,7	-8,5	20,7	-9,9	-11,8	9,6	0,7	22,1	-6,3

V tabulce 5.2 jsou zapsány hodnoty dolní a horní meze konfidenčního intervalu pro průměrné délky front zjištěné dopravním průzkumem (výpočty jsou zpracovány v kapitole Analýza dat potřebných pro simulaci, str. 46). Ty byly následně srovnány s průměrnými délkami front, které vyplynuly vyhodnocením modelu.

Tabulka 5.2 Tabelární srovnání zkoumaných hodnot

Srovnání výsledných hodnot			
Řadící pruh	Dolní mez intervalu zjištěná průzkumem	Simulační model	Horní mez intervalu zjištěná průzkumem
VA	2,86	3,25	3,81
VE	2,53	3,08	3,10
VJ	0,17	0,22	0,37
VB	1,82	2,36	2,43
KB	1,83	2,40	2,41
VC	2,87	3,07	3,86
VG	0,75	0,94	1,15
VD1	0,96	0,97	1,40
VD2	0,28	0,42	0,50

Z důvodu větší názornosti byl v této kapitole vypracován také graf, srovnávající výsledné hodnoty.



Obr. č. 5.1 Srovnání zkoumaných veličin

K dalšímu srovnání došlo mezi počty příjezdějících vozidel k jednomu ze čtyř ramen křižovatky zjištěných průzkumem a hodnotami ze simulačního experimentu. Počty příjezdějících vozidel byly získané dopravním průzkumem pomocí kamerového videozáznamu. S modelem bylo provedeno opět 50 simulačních běhů a z nich byl vypočítán aritmetický průměr. Srovnání těchto hodnot lze vidět v následující tabulce.

Tabulka 5.3 Srovnání počtu příjezdějících vozidel

Srovnání počtu příjezdějících vozidel				
Dopravní proud	Plzeňská od centra (VA+VE)	Mitrovická od Nové Bělé (VJ+VB+KB)	Plzeňská od Krmelína (VC+VG)	Mitrovická od Staré Bělé (VD1+VD2)
Měřeno [voz/hod]	516	523	428	191
Model [voz/hod]	518	524	423	193
Odchylka [%]	-0,3	-0,1	1,1	-0,8

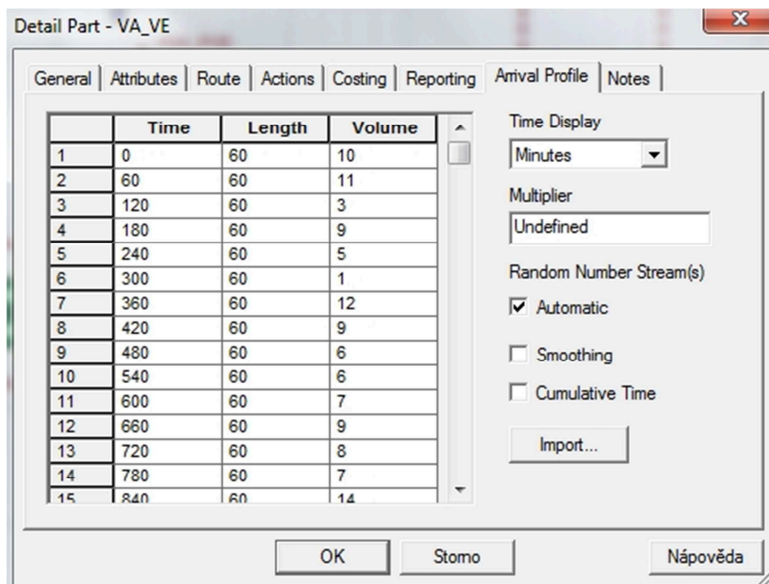
Ze zkoumaných hodnot se zjistilo, že pro průměrnou frontu se hodnoty získané simulací nachází mezi horní a dolní mezí konfidenčního intervalu (vypočítané z dopravního průzkumu). Dále bylo zjištěno, že se počet příjezdějících vozidel v modelu pouze nepatrně liší s hodnotami získanými dopravním průzkumem, tudíž bylo po dohodě s vedoucím diplomové práce prohlášeno, že je model validní.

6 Experiment

Následující část práce bude věnována experimentům, se kterými se v této práci pracovalo. První z experimentů bude zaměřen na změnu pravděpodobnostního rozdělení počtu přijíždějících vozidel v jednotlivých ramenech, další se bude věnovat vlivu změny pozice detektoru na délku fronty. Poslední experiment bude zaměřen na zdržení vozidel v jednotlivých řadících pruzích – srovnání průměrného zdržení vozidel pro obě varianty modelu.

6.1 Experiment věnovaný počtu přijíždějících vozidel

Ve stávajícím modelu v prvku součást je zapsáno, že mezery mezi přijíždějícími vozidly se řídí exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti s parametrem λ . Při vytvoření experimentu je třeba v každé ze čtyř definovaných součástí v nastavení změnit, že se jedná o součást aktivní s profilem. Do nově vzniklé záložky „Arrival Profile“, viz obr. č. 6.1, se zapíše intenzity vozidel v jednotlivých minutách zjištěné měřením. Do okna označeného „Time“ zapíšeme časové rozestupy v sekundách. Sloupec „Length“ značí 60 sekundové intervaly. Do posledního sloupce pojmenovaného „Volume“ se zapíše jednotlivé minutové intenzity zjištěné dopravním průzkumem. Jakmile se provede nastavení u všech čtyř součástí, může být spuštěna simulace.

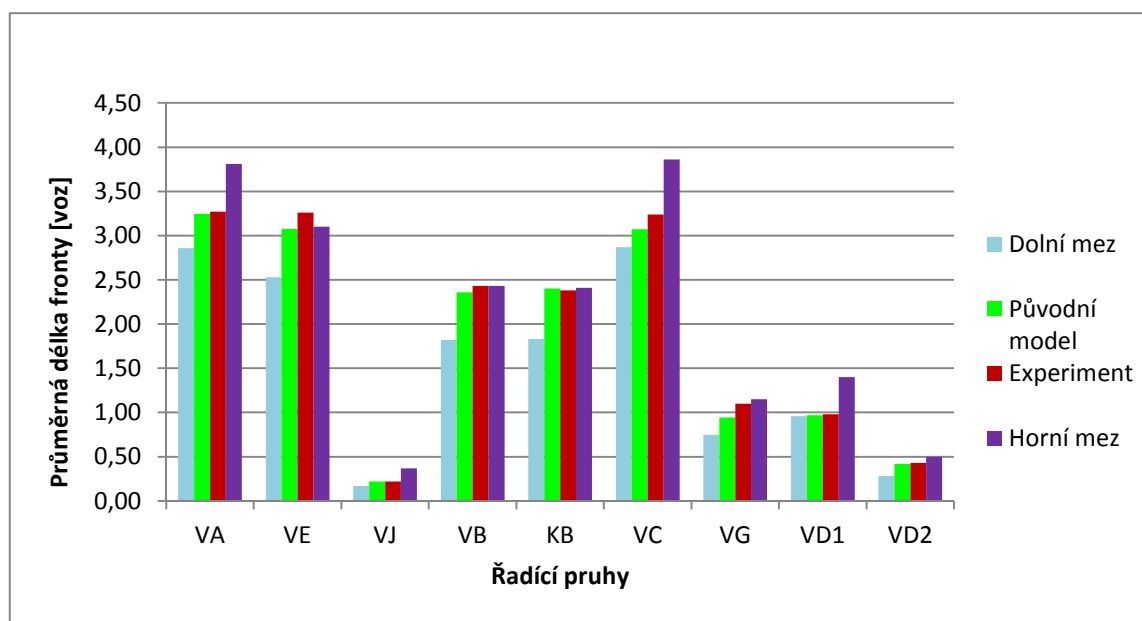


Obr. č. 6.1 Definování vstupních intenzit v součásti

Při simulaci bylo provedeno 50 simulačních běhů. Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulky 6.1 a grafu, viz obr. 6.2, kde byly zároveň srovnány se simulačními hodnotami z původního modelu a dolní a horní mezí konfidenčního intervalu.

Tabulka 6.1 Vstupní intenzity zjištěné dopravním průzkumem

Experiment - změna vstupních údajů				
Řadící pruh	Dolní mez zjištěná průzkumem	Původní model	Experiment	Horní mez zjištěná průzkumem
VA	2,86	3,25	3,27	3,81
VE	2,53	3,08	3,26	3,10
VJ	0,17	0,22	0,22	0,37
VB	1,82	2,36	2,43	2,43
KB	1,83	2,40	2,38	2,41
VC	2,87	3,07	3,24	3,86
VG	0,75	0,94	1,10	1,15
VD1	0,96	0,97	0,98	1,40
VD2	0,28	0,42	0,43	0,50



Obr. č. 6.2 Srovnání průměrných délek fronty z původního modelu s experimentem

Jestliže srovnáme průměrné délky front z původního modelu a průměrné délky front z experimentu je zřejmé, že se od sebe neliší výrazným způsobem.

6.2 Experiment věnovaný vlivu na umístění detektorů

Další experiment bude zaměřen na umístění detektorů v pozemních komunikacích. Ve stávajícím modelu je nastaveno, že se detektory nacházejí na pozicích, kterým odpovídá

reálná situace na křižovatce. Další část práce se bude zbývat otázkou, jak či vůbec se změní průměrná délka fronty v řadících pruzích, když se přepracuje umístění detektorů na pozemní komunikaci.

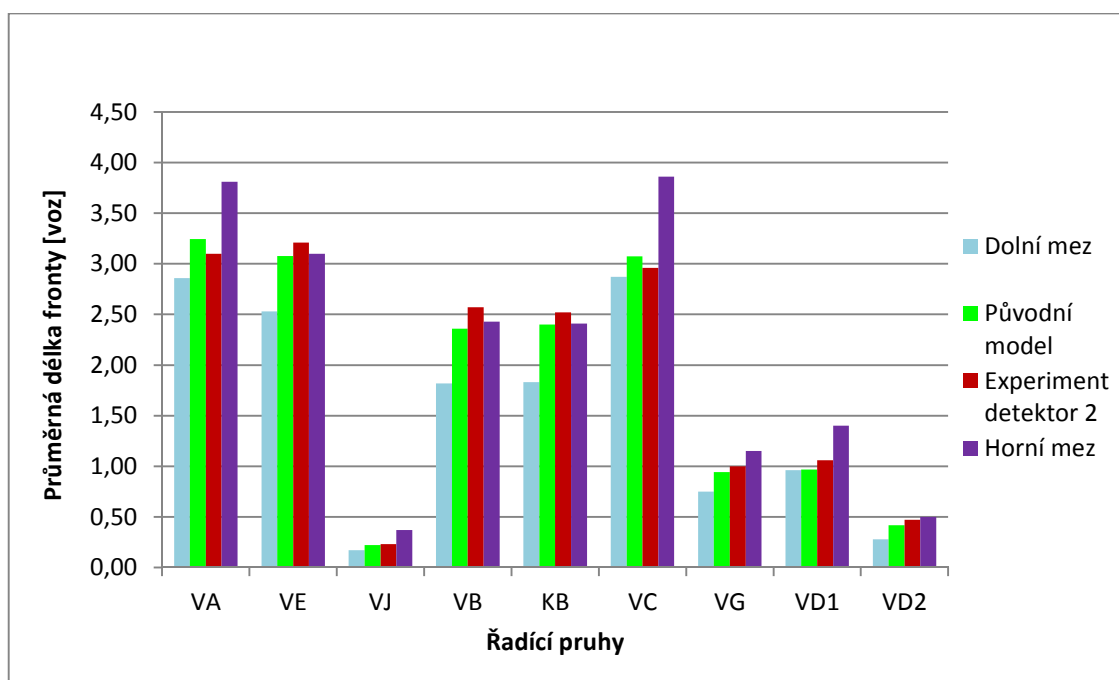
- Experiment A – Změna umístění detektorů pro proudy s nejsilnější intenzitou „VA“ a „VC“ (přiblížení detektorů ke stopčáře)
- Experiment B – Změna umístění detektorů pro proudy s nejsilnější intenzitou „VA“ a „VC“ (oddálení detektorů od stopčáry)

Experiment A

Ve stávajícím modelu je třeba změnit v detailech dopravníků „*Pruh_VA*“ a „*Pruh_VC*“ umístění detektorů. Počáteční nastavení u obou proudů je umístění 4 jednotková vozidla od stopčáry. V záložce „*Sensors*“ do okna „*Position*“ zapíšeme pro oba řadící pruhy hodnotu 2 jednotková vozidla od stopčáry. Po provedení 50 simulačních běhů bude z výsledných hodnot vypočítán aritmetický průměr délek front a výsledné hodnoty budou zaneseny do tabulky a grafu, kde budou porovnány s průměrnými naměřenými hodnotami délek front z dopravního průzkumu a hodnotami vypočítanými simulací z původního modelu viz obr. č. 6.3.

Tabulka 6.3 Umístění detektorů 2 j. v. od stopčáry

Experiment - detektor 2 j.v. od stopčáry				
Řadící pruh	Dolní mez zjištěná průzkumem	Původní model	Experiment detektor 2	Horní mez zjištěná průzkumem
VA	2,86	3,25	3,10	3,81
VE	2,53	3,08	3,21	3,10
VJ	0,17	0,22	0,23	0,37
VB	1,82	2,36	2,57	2,43
KB	1,83	2,40	2,52	2,41
VC	2,87	3,07	2,96	3,86
VG	0,75	0,94	1,00	1,15
VD1	0,96	0,97	1,06	1,40
VD2	0,28	0,42	0,47	0,50



Obr. č. 6.3 Zanesení experimentu s přiblížením detektoru stopčáře do původního grafu

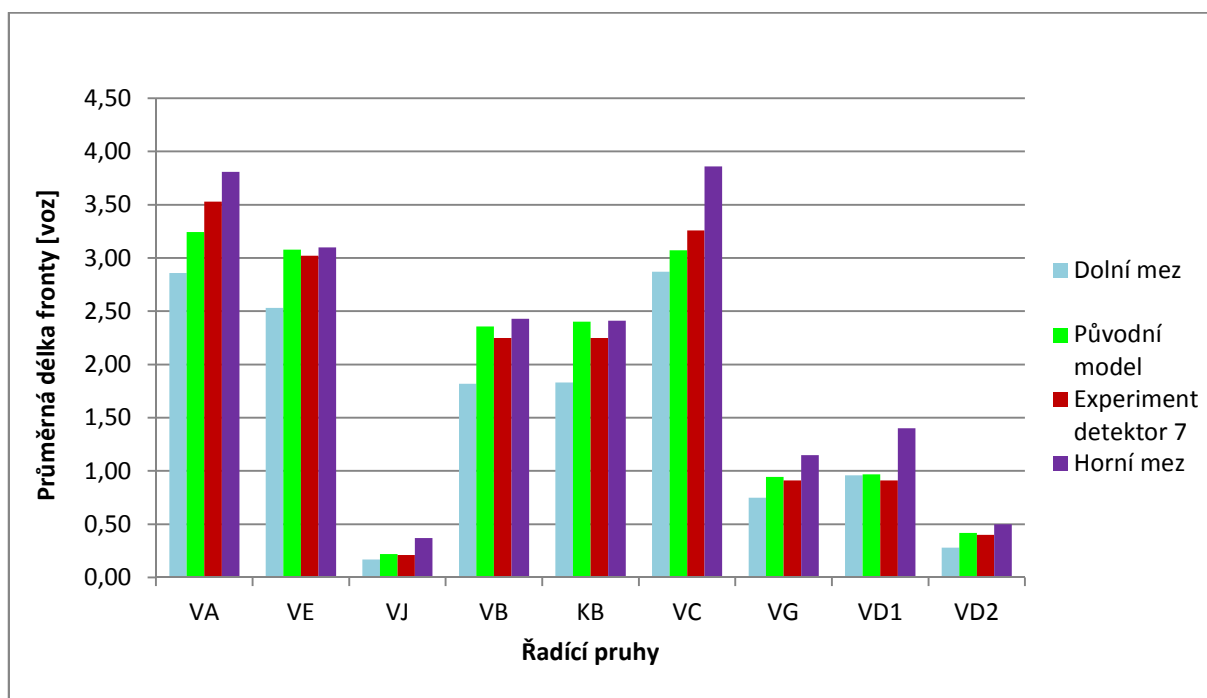
Z grafu lze vyčíst, že výsledné fronty vozidel z počátečního modelu a experimentu se příliš neliší, lze tedy říci, že posunutí detektoru blíže ke stopčáře nemá zásadní vliv na změnu počtu vozidel, čekajících ve frontě před daným ramenem křižovatky.

Experiment B

V druhém případě se detektory oddálily od stopčáry. Nastavení se provedlo analogicky jako ve výše uvedeném případě, jedinou změnou je zapsání do okna „*Position*“, kde se zapíše hodnota 7. Opět bylo provedeno 50 simulačních běhů, srovnání zanesením hodnot do grafu lze vidět v tabulce 6.4, průměrné délky front jsou také zaneseny do obr. 6.4.

Tabulka 6.4 Umístění detektorů 7 j. v. od stopčáry

Experiment - detektor 7 j.v. od stopčáry				
Řadící pruh	Dolní mez zjištěná průzkumem	Původní model	Experiment detektor 7	Horní mez zjištěná průzkumem
VA	2,86	3,25	3,53	3,81
VE	2,53	3,08	3,02	3,10
VJ	0,17	0,22	0,21	0,37
VB	1,82	2,36	2,25	2,43
KB	1,83	2,40	2,25	2,41
VC	2,87	3,07	3,26	3,86
VG	0,75	0,94	0,91	1,15
VD1	0,96	0,97	0,91	1,40
VD2	0,28	0,42	0,40	0,50



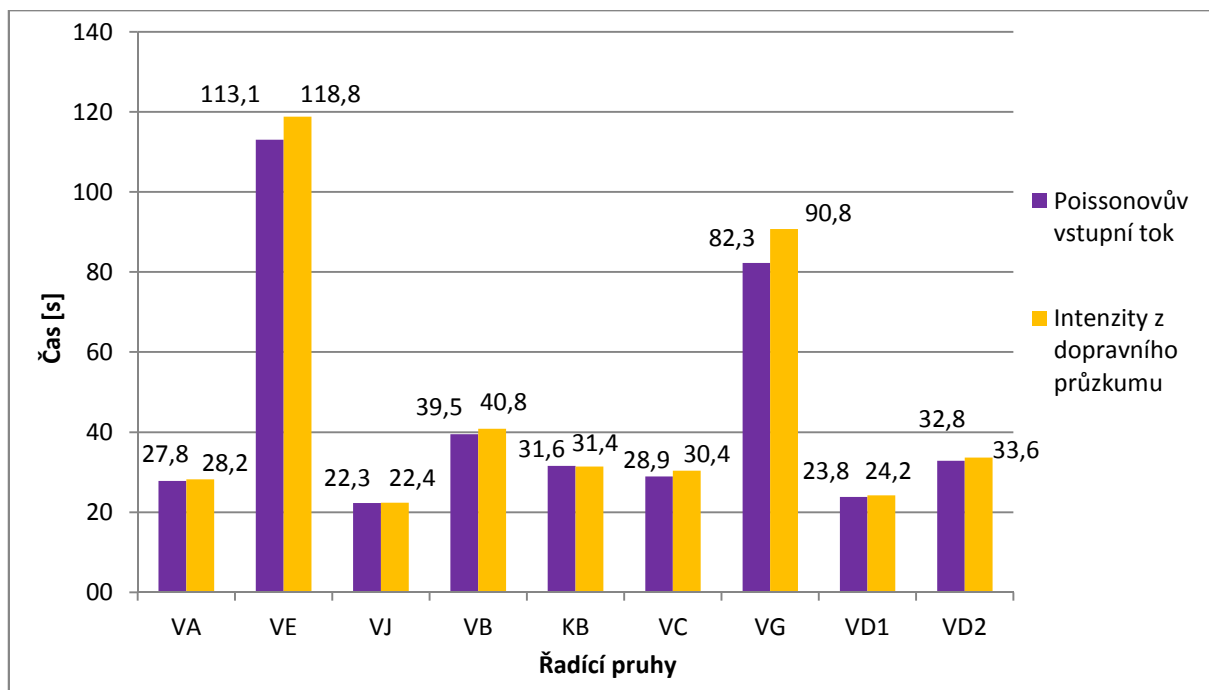
Obr. č. 6.4 Zanesení experimentu s oddálením detektoru od stopčáry do původního grafu

Rovněž z výše vykresleného grafu je patrné, že výsledné fronty vozidel z počátečního modelu a experimentu se velmi neliší, lze tedy konstatovat, že oddálení detektoru od stopčáry nemá podstatný účinek na změnu počtu vozidel, čekajících ve frontě před daným ramenem křižovatky.

6.3 Experiment věnovaný vlivu zdržení vozidel na křižovatce

Experiment vlivu zdržení vozidel v jednotlivých řadících pruzích bude zaměřen na výsledné zdržení vozidel na křižovatce, kde budou porovnány časy zdržení vozidel v počátečním modelu, kde se mezery mezi příjezdy vozidel řídí exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti s časy zdržení vozidel, kde byly vstupní intenzity získány dopravním průzkumem.

Na obr. 6.5 lze vidět srovnání průměrných délek zdržení mezi vozidly řídící se Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti a mezi vozidly řídící se vstupními intenzitami získané dopravním průzkumem.



Obr. č. 6.5 Zdržení vozidel v řadících pruzích

Lze vypořadovat, že v proudech „VE“ a „VG“ nabývá zdržení vozidel největšího rozdílu. Vysvětlením zmíněného jevu může být, že proudy „VE“ a „VG“ mají v signálním plánu signál volno pouze na výzvu, počty přijíždějících vozidel se mohou ve zmíněných dvou případech v daný časový okamžik lišit a tím pádem může být mírně odlišná délka cyklu.

Simulační modely vztahující se k experimentální části práce spolu se simulačními běhy jsou uloženy v příloze E.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo v simulačním modelu v programu Witness vytvořit model, který bude odpovídat dynamickému řízení světelně řízené křižovatky a na základě získaných dat z provozu tento model validovat a provést vybrané experimenty.

Úvodní část diplomové práce byla věnována teoretickým východiskům práce a analýze dat potřebných pro simulaci. Analytická část práce se zabývá lokalizací křižovatky, konkrétně se jedná o čtyřramennou křižovatku Plzeňská x Mitrovická, nacházející se v okrajové části Ostravy. Na řešené křižovatce byl proveden dopravní průzkum, z něhož se zjišťovaly potřebné informace ke konstrukci modelu. Zjišťovaly se intenzity vozidel pro jednotlivé řadící pruhy, bylo třeba zjistit skladbu dopravních proudů, způsob řízení světelně řízené křižovatky, vzdálenost detektorů od stopčáry. K validaci poslouží zjištěné průměrné fronty vozidel v jednotlivých řadících pruzích a celkový počet vozidel, která přijela k jednotlivým ramenům.

Prostřední část práce se zabývala popisem vytvořeného simulačního modelu. Je popsáno a vysvětleno, z jakých prvků se model skládá, k čemu a jak slouží daná proměnná či atribut. Do modelu byly zakomponovány údaje, které byly zjištěny dopravním průzkumem. Nejobtížnější částí v modelu bylo nadefinování dynamického řízení světelně řízené křižovatky, kde se muselo zohlednit umístění detektoru ve vozovce, dále za jakých podmínek bude vozidlo detekováno, nadefinování mezer mezi detekovanými vozidly a prodlužování jednotlivých dob zelených pro každý ze signálů. Po konstrukci modelu byla provedena simulace a bylo stanoveno, že zjištěné fronty vozidel v daných řadících pruzích a celkový počet přijíždějících vozidel k daným ramenům ze simulace vyjadřují uspokojivou míru shody s výsledky vyplývající z dopravního průzkumu. Model byl tedy prohlášen za validní.

Závěrečná kapitola diplomové práce byla zaměřena na zhodnocení provedených experimentů. Zkoumala se změna pravděpodobnostního rozdělení počtu přijíždějících vozidel v jednotlivých ramenech, zkoumal se vliv na umístění detektorů a vliv na výsledné zdržení vozidel v jednotlivých řadících pruzích. V prvních dvou případech byly výsledky z původního modelu a experimentu téměř shodné, tudíž lze říci, že změny měly pouze nepatrný vliv na průměrné fronty v daných řadících pruzích. Experiment věnovaný výslednému odhadu zdržení vozidel v řadících pruzích ukázal, že pro řadící pruhy „VE“

a „VG“ nastaly největší odchylky, což může být způsobeno tím, že v signálním plánu mají zelený signál pouze na výzvu a v daný časový okamžik se počet příjíždějících vozidel v Poissonově vstupním toku a zadanými intenzitami zjištěnými dopravním průzkumem mohou mírně lišit. Ze zmíněného důvodu může být i mírně odlišná průměrná délka cyklu.

Závěrem této diplomové práce bych chtěl ještě dodat, že jsem neměl k dispozici přesně definována pravidla ani údaje k logice dynamického řízení řešené křižovatky, snahou bylo se přiblížit reálné situaci na křižovatce. Výsledné řešení tudíž nemusí přesně odpovídat logice prodlužování zeleného signálu.

Seznam použité literatury

- [1] Křivda, V. Základy organizace a řízení silniční dopravy, 1. vyd., Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2006, 170s. ISBN 80-248-1253-31
- [2] Technické podmínky TP81 – Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu, Brno: Centrum dopravního výzkumu, 1966, 111s. ISBN 80-902141-2-6
- [3] Dopravní detektory [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Dopravni-detektory.pdf>>
[cit. 8. 2. 2013]
- [4] Litschmannová, Martina. Testování hypotéz [online]. Dostupné na WWW:
<http://home1.vsb.cz/~lit40/STA1/Materialy/Testovani_I.pdf>
[cit. 25. 2. 2013]
- [5] Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti [online]. Dostupné na WWW:
<<http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP04/PRAV4.HTM>>
[cit. 24. 2. 2013]
- [6] Exponenciální rozdělení pravděpodobnosti [online]. Dostupné na WWW:
<<http://books.fs.vsb.cz/SystAnal/texty/11.htm>>
[cit. 24. 2. 2013]
- [7] Dorda, Michal, Odhady parametrů základního souboru [online]. Dostupné na WWW:
<http://home1.vsb.cz/~dor028/Aplikace_6.pdf>
[cit. 11. 3. 2013]
- [8] Mapa křižovatky [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.mapy.cz/#q=ostrava&t=s&x=18.248128&y=49.756560&z=16>>
[cit. 8. 1. 2013]

- [9] Ing. Laštůvka, Miroslav. Osobní sdělení. Ostravské komunikace, a. s. Oddělení dopravního inženýrství.
[cit. 26. 2. 2013]

- [10] Bc. Mýdlo, Lukáš. Bakalářská práce – Simulace světelně řízené křižovatky.

- [11] Ing. Lazar, Jiří. Kamerový záznam, osobní sdělení. Magistrát města Ostravy, odbor dopravy, oddělení silnic, mostů, rozvoje a organizace dopravy.
[cit. 11. 3. 2013]

- [12] Technické podmínky 189 – Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích (II. vydání), © EDIP s.r.o. 2012, 76s. ISBN 978-80-87394-06-9

- [13] Technické podmínky 235 – Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek, © EDIP s.r.o. 2011, 52s.

Seznam příloh

- | | |
|-----------|---|
| Příloha A | Zjištěné intenzity z dopravního průzkumu, zjištěné fronty – přiloženo na CD. |
| Příloha B | Data z indukčních smyček – přiloženo na CD. |
| Příloha C | Signální plán. |
| Příloha D | Simulační model, výsledky simulačních běhů – přiloženo na CD. |
| Příloha E | Simulační model s experimenty, výsledky simulačních běhů experimentů – přiloženo na CD. |

Příloha C Signální plán

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490</
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	--------